

**JAKOST OBRÁBĚNÝCH POVRCHŮ PŘI APLIKACI DOKONČOVACÍCH  
METOD OBRÁBĚNÍ S ORIENTACÍ NA SUPERFINIŠOVÁNÍ**

Petr Zámečník

---

Bakalářská práce  
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr Zámečník**  
Osobní číslo: **T11302**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Jakost obráběných povrchů při aplikaci dokončovacích metod obrábění s orientací na superfinišování**

Zásady pro vypracování:

**Teoretická studie jakosti povrchu s orientací na kvantifikaci závislosti jakosti povrchu na řezných parametrech dokončovacích metod obrábění se zaměřením na materiál ČSN 414 109.4, DIN 100Cr6 včetně provedení experimentů a formulaci statistických charakteristik výsledků a vyhodnocení získaných hodnot.**

- 1) Parametry hodnocení drsnosti povrchu**
- 2) Teoretické závislosti drsnosti povrchu na řezných parametrech zejména s orientací na superfinišování**
- 3) Přehled metod měření drsnosti povrchu**
- 4) Metoda provedení experimentů včetně řezných charakteristik při superfinišování**
- 5) Zpracování získaných výsledků analyticky a graficky**
- 6) Celkové zhodnocení výsledků a doporučení pro praxi.**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

[1] AB SANDVIK COROMANT-SANDVIK CZ, s.r.o. příručka obrábění. Přel. M. Kudela, 1. vydání Praha: Scientia, s.r.o., 1997 . 857 s. 857. ISBN 91-97-22 99-4-

[2] KOČMAN, K.: Technologické procesy obrábění. 1.vyd.Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o. Brno, 2011, s.330, ISBN 978-80- 7204-722-2

[3] KOČMAN, K. a kol.: Aktuální příručka pro technický úsek. Verlag Dashofer, 16. aktualizované vydání, Praha 2001. ISBN 80-902247-2-5

[4] ČSN EN ISO 4288 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) ? Struktura povrchu: Profilová metoda, Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Český normalizační institut, 1999

Vedoucí bakalářské práce:

**prof. Ing. Karel Kocman, DrSc.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

**10. února 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**23. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014



doc. Ing. Román Čermák, Ph.D.  
*děkan*



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: Zámečník Petr

Obor: Technologická zařízení

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 29.4.2014

Zámečník

<sup>21</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce požítovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdaním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>22</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>31</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní díla:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užit či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělků jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Ve své práci se zaměřuji na závislost drsnosti povrchu Ra na čase. Bakalářská práce je rozdělena do dvou částí. V teoretické části se zabývám zhodnocením současného stavu dokončovacích operací, měřením drsnosti povrchu, typy označení struktury povrchu a udávám základní závislosti drsnosti povrchu na řezných charakteristikách superfinišování. Druhá část obsahuje vyhodnocení drsnosti povrchu na čase.

Klíčová slova: Broušení, drsnost povrchu, čas

## **ABSTRACT**

In my work I focus on the dependence of the surface roughness Ra of time. The thesis is divided into two parts. The theoretical part deals with the assessment of the current state of finishing operations, measurement of surface roughness, tips indication of surface texture and gives basic dependence of surface roughness on the cutting characteristics of finishing. The second part contains an evaluation of surface roughness on time.

Keywords: Grinding, surface roughness, time

Mé poděkování patří prof. Ing. Karlovi Kocmanovi, DrSc. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

*Motto:*

*„Nic není nesnesitelnějšího než hlupák, který má štěstí.“*

Seneca

# OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 NADPIS ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU DOKONČOVACÍCH OPERACÍ.....	12
1.1 DOKONČOVACÍ METODY OBRÁBĚNÍ .....	12
1.2 ABRAZIVNÍ METODY OBRÁBĚNÍ.....	12
1.2.1 Broušení .....	12
1.2.2 Základní metody broušení.....	15
1.2.3 Vybrané metody broušení .....	16
1.2.4 Broušení hloubkové .....	18
1.2.5 Broušení radiální .....	19
1.2.6 Broušení bezhroté.....	19
1.2.7 Broušení bezhroté průběžné.....	20
1.2.8 Broušení bezhroté zápichové .....	20
1.2.9 Broušení do kulata ploch vnitřních .....	22
1.2.9.1 Axiální broušení.....	22
1.2.9.2 Bezhroté broušení .....	24
1.2.9.3 Bezhroté broušení v tuhých opěrkách.....	24
1.2.9.4 Planetové broušení .....	25
1.2.9.5 Rovinné broušení .....	26
1.2.9.6 Obvodové broušení .....	26
1.2.9.7 Čelní broušení .....	27
1.2.9.8 Tvarové broušení .....	28
1.3 DOKONČOVACÍ METODY OBRÁBĚNÍ .....	29
1.3.1 Honování .....	29
1.3.1.1 Technologická charakteristika honování .....	29
1.3.2 Lapování.....	31
1.3.2.1 Lapovací nástroje.....	31
1.3.3 Superfinašování .....	31
1.3.3.1 Superfinašovací nástroje.....	32
1.4 BEZTRÍSKOVÉ METODY DOKONČOVÁNÍ OBROBENÝCH POVRCHŮ .....	32
1.4.1 Válečkování.....	33
1.4.2 Kuličkování .....	34
1.4.2.1 Dynamické kuličkování .....	34
1.4.2.2 Vibrační kuličkování.....	35
1.4.3 Ultrazvukové nárazové broušení.....	35
1.5 OZNAČOVÁNÍ STRUKTURY POVRCHU .....	36
1.6 PŘESNOSTI DOSAHOVANÉ VYBRANÝM ZPŮSOBEM DOKONČOVACÍ OPERACE .....	39
2 PARAMETRY HODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU .....	40
2.1 JAKOST POVRCHU .....	40
2.2 ZÁKLADNÍ ČSN EN ISO NORMY POPISUJÍCÍ STRUKTURU POVRCHU.....	40
2.3 ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE.....	41
2.4 DEFINICE PARAMETRŮ PROFILU NEROVNOSTÍ.....	43
2.4.1 Výškové parametry (výstupky a prohlubně).....	43



2.4.1.1	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra ( $\mu\text{m}$ ) .....	43
2.4.1.2	Největší výška výstupku profilu, Pp, Rp, Wp: .....	43
2.4.1.3	Největší hloubka prohlubně profilu, Pv, Rv, Wv: .....	44
2.4.1.4	Největší výška profilu, Pz, Rz, Wz: .....	45
2.5	DÉLKOVÉ PARAMETRY .....	46
2.5.1	Průměrná šířka prvků profilu Rsm .....	46
<b>3</b>	<b>TEORETICKÉ ZÁVISLOSTI DRSNOSTI POVRCHU NA ŘEZNÝCH PARAMETRECH ZEJMÉNA S ORIENTACÍ NA SUPERFINIŠOVÁNÍ .....</b>	<b>47</b>
3.1	KINEMATIKA SUPERFINIŠOVÁNÍ .....	47
3.2	DOSAHOVANÉ VÝSLEDKY SUPERFINIŠOVÁNÍ.....	48
<b>4</b>	<b>PŘEHLED METOD MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU .....</b>	<b>50</b>
4.1	HODNOCENÍ KVALITATIVNÍ .....	50
4.2	HODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHŮ DOTYKOVÝMI PROFILOMETRY.....	50
4.3	METODA MĚŘENÍ POMOCÍ SVĚTELNÉHO ŘEZU .....	52
4.4	MĚŘENÍ S POUŽITÍM INTERFERENCE SVĚTLA .....	53
4.4.1	Postupy a pravidla pro kontrolu dotykovými přístroji .....	55
4.5	VYHODNOCENÍ PARAMETRŮ.....	57
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>58</b>
<b>5</b>	<b>NADPIS METODA PROVEDENÍ EXPERIMENTŮ VČETNĚ ŘEZNÝCH CHARAKTERISTIK PŘI SUPERFINIŠOVÁNÍ.....</b>	<b>59</b>
5.1	URČENÍ PARAMETRŮ DRSNOSTI PRO DOKONČOVACÍ METODY OBRÁBĚNÍ .....	59
5.2	ÚVOD .....	59
5.3	ZDROJOVÉ ROVNICE PRO STANOVENÍ PARAMETRU RA. ....	60
5.4	METODIKA PŮVODNÍHO PLÁNU EXPERIMENTU PRO STANOVENÍ KONSTANT PRO RŮZNÉ ZÁKLADNÍ ROVNICE PRO RA.....	61
5.5	ZÁVĚR VÝPOČTU .....	66
<b>6</b>	<b>ZPRACOVÁNÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ ANALYTICKY A GRAFICKY .....</b>	<b>67</b>
6.1	NAMĚŘENÉ HODNOTY RA NA ČASE .....	68
6.2	VÝPOČET ZADANÝCH ÚLOH DLE NAMĚŘENÝCH HODNOT V TABULKÁCH.....	68
<b>7</b>	<b>CELKOVÉ ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A DOPORUČENÍ PRO PRAXI....</b>	<b>82</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>83</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>85</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>87</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>90</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>92</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>93</b>

## ÚVOD

Broušení a superfinišování od nepaměti aplikujeme k opracování a obrábění kovů. V historii se můžeme setkat s broušením pomocí materiálů z přírodních prvků, které v dané době bylo možno sehnat k úpravě nástrojů, ale i šperků, zbraní a jiných aplikací.

Broušení a jeho vývoj si prošel různými etapami, ale největšího využití zažilo na počátku 19. století, kdy se začala uplatňovat v praxi hromadná a velmi přesná výroba součástí.

Slovem broušení si můžeme představit dokončovací operaci, jejíž předností je velmi vysoká přesnost povrchu, ale také velmi vysokou přesností geometrie a patří k významným technologiím této doby. Při broušení je nástrojem brousící kotouč u superfinišování jsou to jemné superfinišovací kameny. Význačným parametrem pro brousící kotouč je nerovnoměrné rozmístění zrn po obvodu brousícího kotouče. Zrna mají různou velikost, tvar spojena jsou pojivem. Mohou být přírodní, nebo umělá. Brousící kotouč může nabývat různých tvarů a velikostí.

Broušení a superfinišování nachází velmi široké uplatnění ve strojírenství a mimo jiné taky v běžném životě. Nespočet věcí v domácnosti bylo vyrobeno právě touto aplikací ať už kuchyňský nůž, nebo noha stolu. Značnou aplikaci broušení a superfinišování můžeme hledat hlavně ve strojních součástkách, např. ložiska, vřetena a jiných důležitých součástí.

Od broušení a superfinišování očekáváme zlepšení kvality ploch obráběné součásti. Při použití tohoto způsobu obrábění, které spadá do skupiny dokončovací operace, dochází ke vzniku velmi vysoké teploty. Proto je často u broušení použita chladící kapalina.

Cílem mé bakalářské práce bylo vypočítat střední hodnotu  $R_a$ , pomocí regresní analýzy kvantifikovat závislost  $R_a = f(\text{času})$  s předpokládanou závislostí, výběrový rozptyl, směrodatnou odchylku, s pravděpodobností 99,73% vypočítat pro každý soubor maximální a minimální hodnotu  $R_{a \max}$  a  $R_{a \min}$  a pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude u jednotlivých časů v rozmezí zadaných hodnot.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 NADPIS ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU DOKONČOVACÍCH OPERACÍ

Dokončovací operace mají v technické praxi široké uplatnění. Mezi hlavní výhody patří vysoká rozměrová přesnost výroby, velmi vysoká jakost obrobených povrchů a cenově dostupná výrobní technologie.

## 1.1 Dokončovací metody obrábění

- Broušení
- Honování
- Lapování
- Superfinašování
- Válečkování
- Kuličkování
- Ultrazvukové nárazové broušení

## 1.2 Abrazivní metody obrábění

Jako abrazivní metody obrábění v průmyslu jsou členěny nástroje s nedefinovanou geometrií břitu. Patří mezi nejdůležitější a nejpoužívanější procesy při obrábění strojírenských součástí, u kterých je třeba dodržet vysokou přesnost a kvalitu obrobených ploch. Mezi jmenované metody patří například: **broušení, honování, lapování, superfinašování.** [1]

### 1.2.1 Broušení

Je dokončovací operace, která se vyznačuje:

- Velkou přesností obrobené plochy
- Vysokou jakostí obrobené plochy
- Je nejvýznamnější technologie obrábění dnešní doby

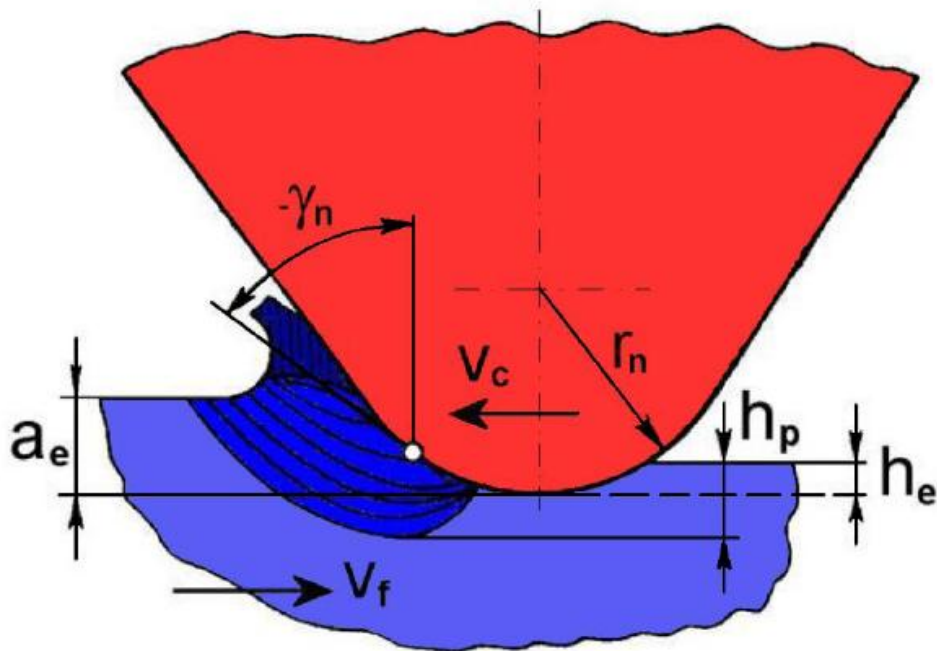
Broušení nám umožňuje v průmyslu dosáhnout vyšší a přesnější jak tvarovou tak i rozměrovou kvalitu vyráběné součásti. Svojí přesností je považována za vysoce přesnou dokončovací operaci. Brousící kotouč je specifický svým nepravidelným uspořádáním zrn po celém jeho povrchu. Brousící kotouč umožňuje z povrchu součásti odebrat velké množství malých třísek. [1]

Na rozdíl od jiných metod třískového obrábění, není zde pevně definována geometrie břitu. [1]

Další specifickou vlastností broušení od jiných třískových metod obrábění je plocha odstraněné třísky, která je velmi malá na rozdíl od frézování a soustružení. Obvykle se pohybujeme okolo 0,001 mm<sup>2</sup>. Při této operaci dochází také ke vzniku velkého množství tepla z důvodu vysoké řezné rychlosti a negativnímu úhlu řezu jednotlivých elementů. Vzniklé teplo může produkovat reziduální napětí (500 až 2000 MPa) a může mít negativní vliv na životnost povrchů namáhaných dynamicky a cyklicky. [1]

V povrchu broušeného výrobku dochází nejen k plastické a elastické deformaci, ale také i k takzvaným „strukturálním změnám“. V důsledku velkých objemových změn v určitých vrstvách dochází k tahové a tlakové reziduální napětí. Tlakové napětí je považováno za pozitivní, dochází při něm ke zvýšení únavové pevnosti a zvyšuje odolnost povrchu proti vnějším mechanickým vlivům. Na rozdíl od tahového napětí, které má za následek snížení únavové pevnosti a může dojít k poškození dynamicky namáhaných povrchů. Jako příklad můžeme uvést oběžné dráhy valivých ložisek. [1]

Několikaleté zkoumání nových technologií v této oblasti dokončovacích a přesných operací obráběných ploch přinesl vývin nových progresivních brousících materiálů, které v průmyslu umožní zvýšení výkonů a snížení teploty při kontaktu broušeného povrchu s brousícím kotoučem. Výsledkem je vyšší kvalita a přesnost broušené plochy materiálu. Výzkum nových brousících materiálů jsou materiály na bázi vysokoporézních brousících materiálů, sintrovaných korundů. Je to uměle vytvořený typ mikrokrystalického korundu, který se vyrábí na malou velikost jeho krystalů a má stejné řezné vlastnosti. V průměru až 50 krát menší na rozdíl od ušlechtilého korundu. [1]



Obr. 1. Popis úběru brousícího elementu: [1]

$\gamma_n$  – normální úhel čela,  $r_n$  – poloměr zaoblení ostří,  $a_e$  – pracovní (radiální) záběr,  $h_p$  – vrstva ovlivněná plastickou deformací,  $h_e$  – vrstva ovlivněná pružnou deformací,  $v_c$  – řezná rychlost,  $v_f$  – rychlost posuvu [2]

Dosahované parametry:

Tab. 1. Dosahované parametry: broušení [4]

Obráběné plochy	Metoda obrábění		Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [ $\mu\text{m}$ ]	
			střední	rozsah	střední	rozsah
Vnější rotační	Broušení	hrubovací	10	9 ÷ 11	2,4	0,80 ÷ 3,20
		dokončovací	5	5 ÷ 6	0,4	0,20 ÷ 0,60
		jemné	4	3 ÷ 5	0,2	0,05 ÷ 0,40
Vnitřní rotační		hrubovací	10	9 ÷ 11	2,4	1,60 ÷ 3,20
		dokončovací	6	5 ÷ 7	0,8	0,40 ÷ 1,60
		jemné	5	3 ÷ 6	0,2	0,05 ÷ 0,40
Rovinné		hrubovací	10	9 ÷ 11	2,4	1,60 ÷ 3,20
		dokončovací	6	5 ÷ 7	0,8	0,40 ÷ 1,60
		jemné	5	3 ÷ 6	0,2	0,05 ÷ 0,40

Práce brousícího kotouče se liší od jiných obráběcích nástrojů hlavně schopností samoostření. Jelikož je brousící zrna k brousícímu kotouči jemně ukotveno. To má v důsledku vyšších řezných sil, že se obroušené zrna samovolně odlomí a jejich funkci přebírají automaticky zrna neobroušená. [1]

### 1.2.2 Základní metody broušení

Základní metody broušení jsou vyvozovány a řazeny do skupin podle hlavního posuvu stolu k poloze brousícího kotouče.

Definujeme:

- **Axiální broušení**

Brousící kotouč je umístěn rovnoběžně s osou hlavního posuvu stolu. [1]

- **Tangenciální broušení**

Hlavní posuv stolu je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče ve zvoleném bodě D. [1]

- **Radiální broušení**

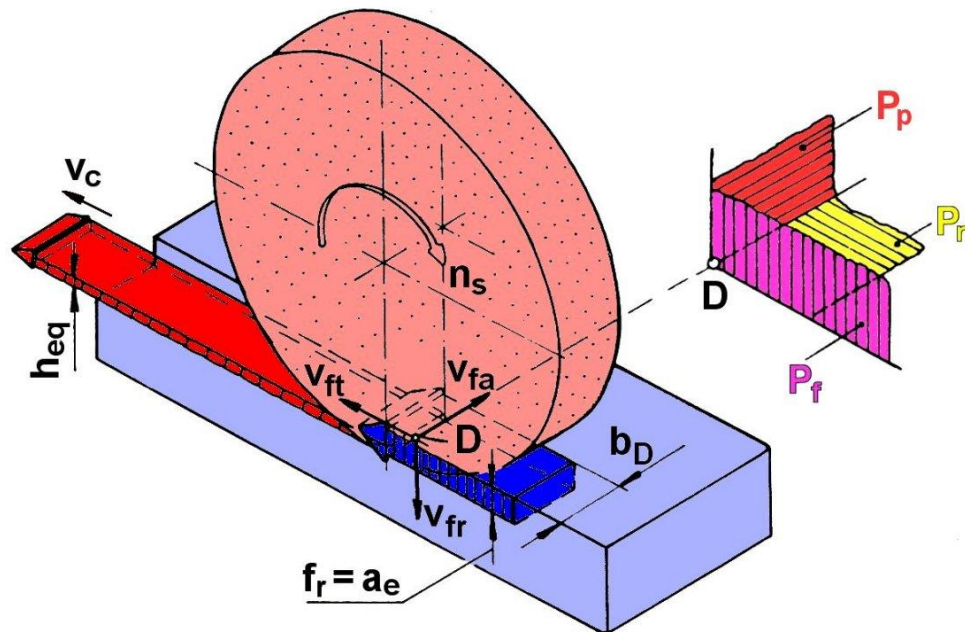
Hlavní posuv stolu ve zvoleném bodě D je radiální směrem ke kotouči. [1]

- **Obvodové zápichové broušení**

Směr, rychlost a hlavní posuv stolu je plynule radiální. [1]

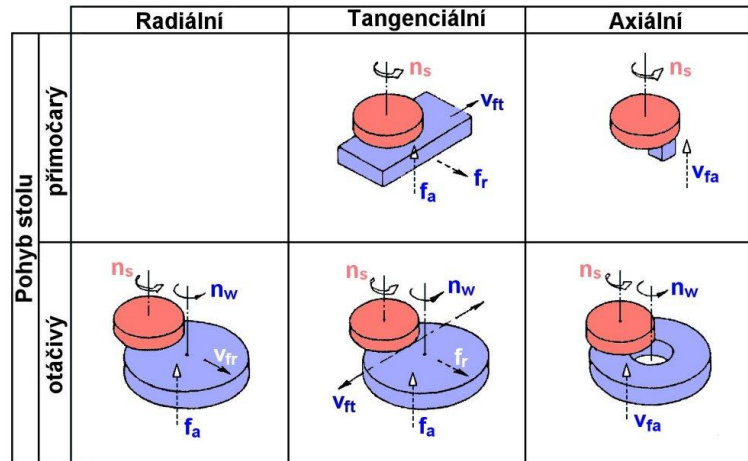
- **Čelní zápichové broušení**

Směr, rychlost a hlavní posuv stolu je plynule axiální. [1]



Obr. 2. Kinematické charakteristiky broušení [5]

$P_p$ -nástrojová rovina zadní,  $P_r$ -nástrojová rovina základní,  $P_f$ -nástrojová rovina boční [1]



$n_s$  - frekvence otáčení brousícího kotouče,  $n_w$  - frekvence otáčení obrobku,  
 $v_{fa}$  - axiální rychlost posuvu stolu,  $v_{ft}$  - tangenciální rychlost posuvu stolu,  
 $v_{fr}$  - radiální rychlost posuvu stolu,  
 $f_a$  - axiální posuv stolu,  $f_r$  - radiální posuv stolu

Obr. 3. Popis základních způsobů čelního broušení [1]

### 1.2.3 Vybrané metody broušení

Procesy broušení se dají charakterizovat a uskutečňovat různými metodami, které se aplikují podle dané problematiky. [1]

#### Vnější rotační broušení s posuvem

- Podélným
- Příčným
- Bezhraté broušení
- Broušení v kluzných opěrkách

#### Vnitřní broušení

- Při otáčení obrobku
- Posuv podélný a příčný
- Planetové broušení bezhraté broušení

#### Rovinné broušení

- Obvodem brousícího kotouče
- Čelem brousícího kotouče

#### Speciální metody broušení

- Tvarové
- Závitové

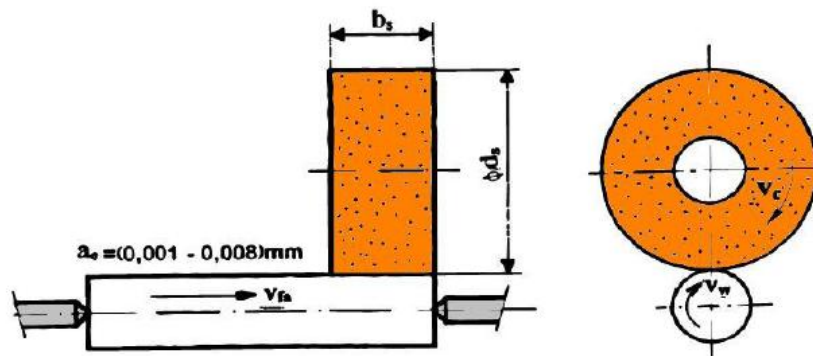


**Popis metod broušení**

V průmyslové výrobě se aplikuje mnoho metod broušení na klasických, nebo automatických CNC bruskách. [1]

**Broušení obvodové s posuvem axiálním:**

Broušení s tímto posuvem se aplikuje při broušení dlouhých součástí. Obráběná součást je upnuta mezi hroty a vykonává rovnoběžný pohyb posuvový s osou obrobku. [1]



Obr. 4. Princip obvodového broušení s podélným (axiálním) posuvem. [1]

	Rovinné broušení - pohyb stolu		Broušení do kulata	
	přímočarý	otáčivý	Vnější plochy	Vnitřní plochy
Axiální				
Tangenciální				
Radiální				

$n_s$  - frekvence otáčení brousícího kotouče,  $n_w$  - frekvence otáčení obrobku,  
 $v_{fa}$  - axiální rychlost posuvu stolu,  $v_{ft}$  - tangenciální rychlost posuvu stolu,  
 $v_{fr}$  - radiální rychlost posuvu kotouče,  
 $f_a$  - axiální posuv stolu,  $f_r$  - radiální posuv kotouče

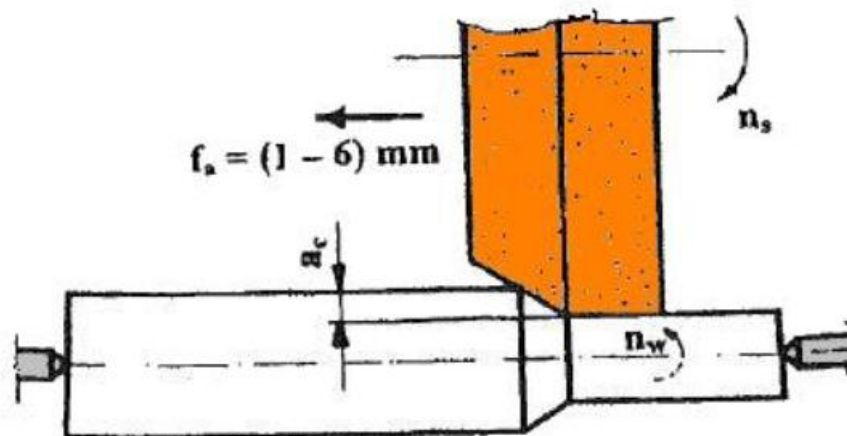
Obr. 5. Vybrané způsoby obvodového broušení [1]

### 1.2.4 Broušení hloubkové

Broušení nástrojem připravený na daný rozměr (broušení hloubkové) je metoda broušení, při kterém se přídavek ponechaný na opracování obrousí v jednom kroku najednou s co nejmenším axiálním posuvem stolu. [1]

v tomto procesu nenajdeme produktivnější metodu, jako je metoda hloubkového broušení. Aplikuje se při malých přídavcích na opracování. Používá se pracovní záběr v rozmezí  $a_e = (0,1 - 0,4)$  mm. Výkon hloubkového broušení je vyšší o (25 - 75)% než při broušení axiálním. [1]

Pro hrubování se používá u brousících kotoučů kuželové zkosení. Dochází ke zlepšení podmínek broušení. Stupňovité tvarování kotoučů se používá pro velké přídavky na opracování. [1]



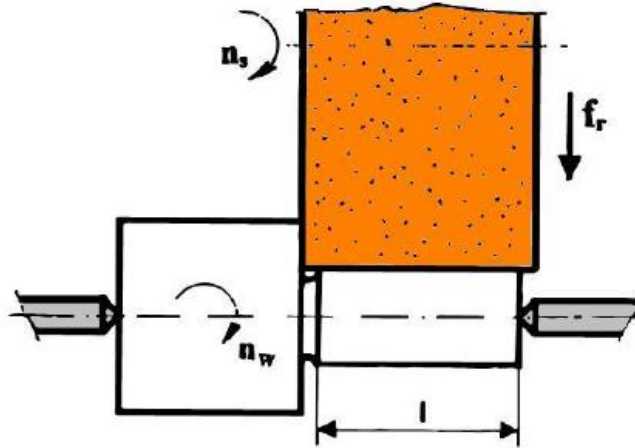
Obr. 6. Princip hloubkového broušení [1]

$\omega_s$  – frekvence otáčení brousícího kotouče;  $\omega_w$  – frekvence otáček obrobku;  $f_a$  – šířka broušené plochy

Řezná rychlost  $v_c$  a obvodová rychlost otáčení obrobku  $v_w$  se rovnají s broušením s podélným posuvem. [1]

### 1.2.5 Broušení radiální

Aplikuje se při broušení tuhých obrobků o maximální délce do 350 mm. Brousící výkon je asi o (40 – 80)% vyšší než u broušení axiálního. [5]



Obr. 7. Princip zapichovacího broušení [1]

$n_s$  – frekvence otáčení brousícího kotouče;  $n_w$  – frekvence otáček obrobku;  
 $f_r$  – radiální posuv stolu na jednu otáčku obrobku;  $l$  – délka obráběné plochy

Řezná rychlost  $v_c$ , obvodová rychlost otáčení obrobku  $v_w$  se rovná jako u axiálního broušení. [1]

Při hrubém broušení se volí radiální posuv stolu na jednu otáčku obrobku: [1]

- $f_r=(0,0025-0,0075)\text{mm}$

Při broušení na čisto:

- $f_r=(0,001-0,005)\text{mm}$

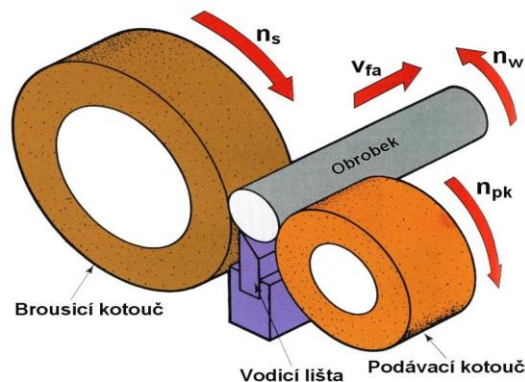
### 1.2.6 Broušení bezhroté

Aplikace bezhrotého broušení umožní v praxi vysokou produktivitu vykonané práce při zapichovacím i průchozím způsobu broušení. Jeho použití je využíváno hlavně v sériové a hromadné výrobě. [1]

### 1.2.7 Broušení bezhroté průběžné

Jeho použití v praxi se hojně využívá pro broušení hladkých a přesných součástí válcovitého tvaru. [1]

Při této metodě je třeba dvou brousících kotoučů, mezi které je umístěn obrobek. Jeden kotouč je brousící a druhý kotouč je podávací. Kotouč brousící má dvojnásobný průměr než kotouč podávací. Při broušení se obrobek otáčí obvodovou rychlostí, která se rovná rychlosti podávacího kotouče, jehož osa je aplikována v rozmezí (5 – 35)mm nad osami brousícího a podávacího kotouče. Mezi oběma kotouči prochází kalená vodící lišta, pomocí které je veden obrobek. Změnou úhlu podávacího kotouče se rozloží jeho obvodová rychlost na dvě složky, vodorovná složka uděluje axiální pohyb a svislá jím otáčí danou obvodovou rychlostí. Posuvová rychlost se určuje podle zmenšování, nebo zvětšování úhlu  $\alpha$  a její hodnota se pohybuje v rozmezí 1500 až 4500 mm.min<sup>-1</sup>. [1]



Obr. 8. Princip bezhrotého průběžného broušení[1]

$n_s$  - obvodová rychlost brousícího kotouče;  $n_{pk}$  - obvodová rychlost podávacího kotouče;

$V_{fa}$  - obvodová rychlost obrobku;  $V_{fa}$  -axiální rychlost posuvu obrobku

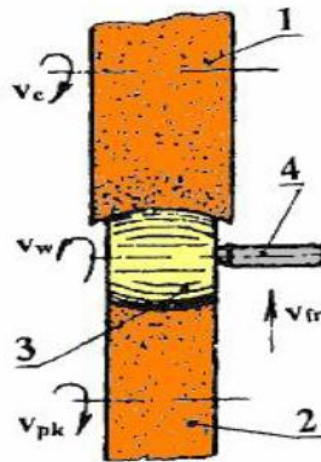
### 1.2.8 Broušení bezhroté zápichové

Jeho hlavní využití můžeme nalézt zejména v sériové výrobě tuhých a menších obrobků. Nástroj vykonává radiální posuv kolmo ke směru osy obrobku. Délka broušené plochy nebývá větší než 100mm a to z důvodu růstu aktivní plochy kotouče a tím i sil řezných a příkonu potřebného k obrábění. [2]

V praxi se používá u součástí, které mají nákrůžek, tvarové, nebo kuželové plochy a které

nemají středící dülky. Obrobek se vloží axiálně z vrchní části k dorazu mezi podávací a brousící kotouč, jejichž osy jsou rovnoběžné. [5]

Brousí se na dva úběry s přidavkem pro druhý úběr (0,03 – 0,05)mm. [1]



Obr. 9. Princip bezhrotého zápichového broušení[1]

1 – brousící kotouč; 2 – podávací kotouč; 3 – obrobek; 4 – doraz;  $v_c$  – obvodová rychlost brousícího kotouče;  $v_w$  – obvodová rychlost obrobku;  $v_{pk}$  – obvodová rychlost podávacího kotouče;  $v_{fr}$  – radiální rychlost posuvu stolu

Tab. 2. Volba řezných podmínek při bezhrotém broušení-průběžný způsob [1]

Druh práce	Průměr broušené součásti $d_w$ [mm]	Přídavek na průměr $2a_e$ [mm]	Úhel nastavení $\alpha$	Obvodová rychlost podávacího kotouče $v_w$ [m.min <sup>-1</sup> ]
<b>Hrubování</b>	do 10	0,04 až 0,06	3 až 4	150 až 80
	10 až 25	0,06 až 0,1	2,5 až 3,5	120 až 50
	25 až 75	0,1 až 0,3	2 až 3,5	50 až 10
	75 až 150	0,2 až 0,4	1 až 2,5	25 až 8
<b>Broušení na čisto</b>	-	0,005 až 0,02	1,5 až 2	120 až 50

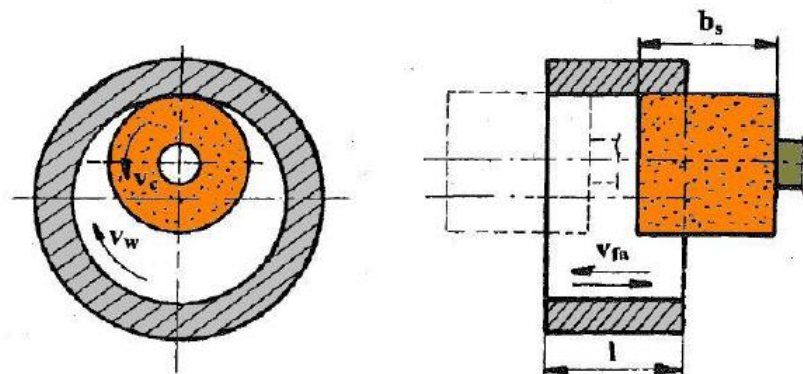
Tab. 3. Volba řezných podmínek při bezhrotém broušení-zapichovací způsob [1]

Druh práce	Radiální posuv na 1 otáčku obrobku $f_r$ [mm]	Obvodová rychlost podávacího kotouče $v_w$ [m.min <sup>-1</sup> ]
<b>Hrubování</b>	0,005 až 0,02	10 až 25
<b>Broušení na čisto</b>	0,03 až 0,01	10 až 25

## 1.2.9 Broušení do kulata ploch vnitřních

### 1.2.9.1 Axiální broušení

Uvnitř otvoru se otáčí brusný kotouč rychlostí  $v_c$  kde se posouvá ve směru osy otvoru posuvem  $v_{fa}$  obráběný díl se otáčí o určité frekvenci otáčení  $n_w$ . Odstranění přídavku broušením zaručí vzájemné posunutí broušeného dílu a brousícího kotouče kolmo na broušený povrch dílu o radiální hodnotu  $a_e$ . [1]



Obr. 10. Princip broušení vnitřního s posuvem podélným a přísuvem radiálním [1]

Tento proces vnitřního broušení ovlivňuje hlavně geometrické rozměry broušené součásti a to průměr broušeného otvoru. Průměr kotouče  $d_s$  je maximálně 0,7 až 0,9 průměru broušeného otvoru  $d_w$  hlavně proto musí mít brousící kotouč přiměřený průměr pro broušení menších otvorů. Brousící podmínky jsou nepříznivé, protože brousící zrna nepříznivě vstupují do aktivního procesu, oddělování třísky se velmi namáhají. Právě proto se brousící kotouče o malých průměrech velmi rychle opotřebovávají, zanáší se, tím ztrácí potřebnou jak řeznou schopnost, tak i geometrický tvar. To je důvodem častého orovnávání kotouče a musí mít zajištěné poměrně vysoké otáčky, což je někdy poměrně těžké zabezpečit. Dosáhnutí vyšších otáček vřetene je poměrně obtížné, otvory malých rozměrů se brousí malými rychlostmi a to má za následek, že nedokážeme vybrousit povrch o tak vysoké kvalitě, jakou požadujeme. [5]

Čím je tuhost technologického systému menší, tím větší je možnost překopírovat chyby geometrického tvaru předpracovaného otvoru. [1]

Když volíme obvodovou rychlost broušené součásti  $v_w$  musíme brát v úvahu, že když se zvyšuje  $v_w$  se zlepšuje odvádění tepla a klesají možnosti vzniku opalů na daném broušeném povrchu součásti. Drsnost povrchu se s kratší dobou doteku součásti s brousícím kotoučem zhoršuje. Se zvýšením frekvence otáčení součásti narůstají nežádoucí odstředivé síly a to má za následek zvýšené chvění. To má vliv na zhoršující se technologické podmínky stroje. [1]

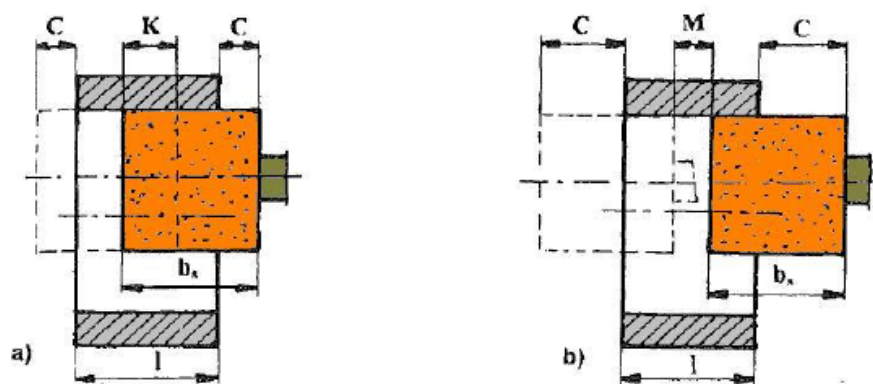
Poměr rychlostí  $v_w$  a  $v_c$  je mezi 1:60 až 1:100.

Volíme-li obvodové rychlosti broušeného obrobku, musíme v úvahu brát tyto faktory: [1]

- Druh tepelného zpracování a materiál
- Řezné parametry
- Druh brousícího kotouče

Tab. 4. Volba řezných poměrů při vnitřním broušení [1]

Druh práce	Podélný (axiální) posuv $f_a$ [mm]	Pracovní (radiální) záběr $a_e$ [mm]	Obvodová rychlost obrobku $v_w$ [m.min <sup>-1</sup> ]
<b>Jednoduché brusky</b>			
▪ hrubování	$(0,4 \div 0,7) \cdot b_s$	$0,005 \div 0,02$	$20 \div 40$
▪ broušení na čisto	$(0,25 \div 0,4) \cdot b_s$	$0,0025 \div 0,01$	$20 \div 40$
<b>Poloautomatické brusky</b>			
▪ hrubování	$(0,4 \div 0,75) \cdot b_s$	$0,0025 \div 0,005$	$50 \div 150$
▪ broušení na čisto	$(0,25 \div 0,4) \cdot b_s$	$0,0015 \div 0,0025$	$50 \div 150$



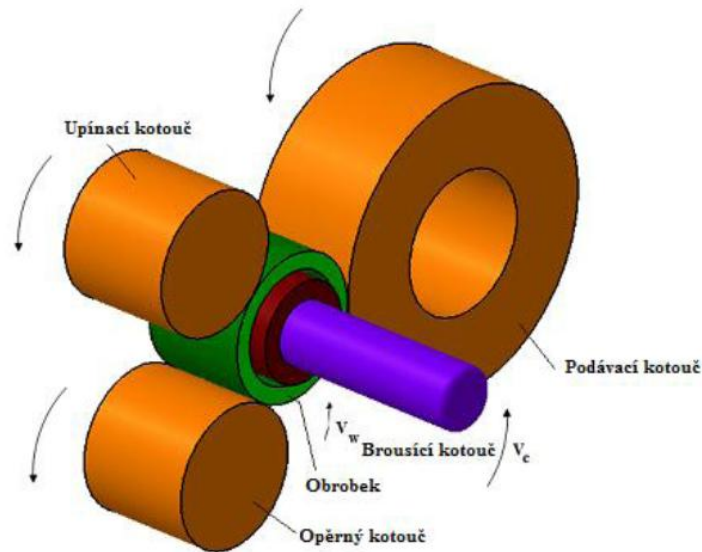
Obr. 11. Schéma vnitřního broušení

*a* – s překrytím; *b* – s průsvitem; *C* – přeběh kotouče; *K* – překrytí; *M* – průsvit

*b<sub>s</sub>* – šířka brousícího kotouče; *l* – délka obráběné plochy



### 1.2.9.2 Bezhraté broušení



Obr. 12. Schéma vnitřního bezhratého broušení [6]

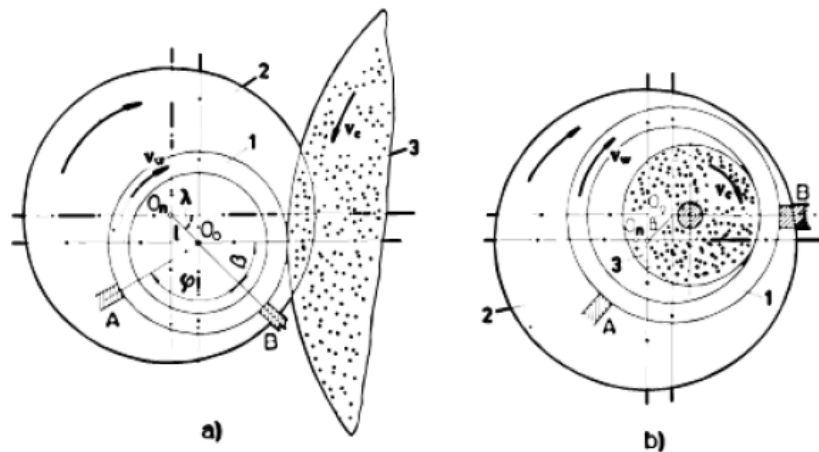
Broušený díl se vkládá mezi podávací kotouč, opěrný kotouč a upínací kotouč. Podávací kotouč nám zajišťuje neustálý otáčivý pohyb daného broušené součásti. Opěrný kotouč zajišťuje bezpečnou a fixovanou polohu broušené součásti. Upínací kotouč neustále přitlačuje a tím zajišťuje upnutí broušené součásti během tohoto procesu. [1]

Způsob bezhratého broušení lze jen použít u součástí, které mají požadovaný válcový vnější povrch souosý s broušeným vnitřním povrchem. Nepožadované geometrické odchylky vnějšího povrchu broušené součásti mají za následek nepřesnosti při otáčení, protože se daná součást ustavuje od vnějšího povrchu. Tento způsob broušení zajišťuje vysokou přesnost, kterou nedokážeme získat od klasického vnitřního broušení. [1]

### 1.2.9.3 Bezhraté broušení v tuhých opěrkách

Požadovanou vysokou přesnost geometrického tvaru broušené součásti zajistíme aplikací bezhratého broušení v tuhých opěrkách. Tato metoda lze realizovat jak pro vnější, tak i pro vnitřní broušení. [1]





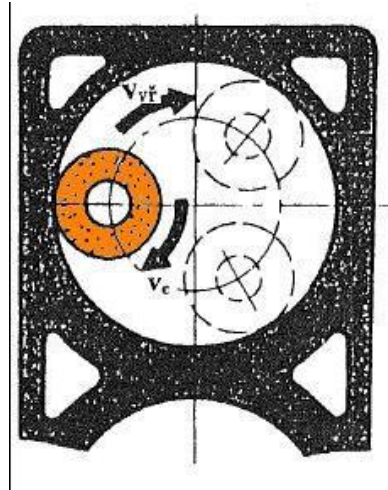
Obr. 13. Schéma bezhrotého broušení v tuhých opěrkách [1]

*a* – vnější broušení; *b* – vnitřní broušení; 1 – obrobek; 2 – příruba; 3 – brousící kotouč; A – opěrka; B – opěrka

#### 1.2.9.4 Planetové broušení

Metoda vhodná pro broušení děr na součástech, které z nějakých důvodů nelze upnout ve sklíčidle nebo čelistech. Pro tyto díly se používá Planetové broušení. Strojem jsou Planetové brusky. Broušený díl se upne na stole planetové brusky a vřeteno s brousícím kotoučem vykonává otáčivý pohyb kolem vlastní osy danou obvodovou rychlostí  $v_c$  a posouvá se kolem osy broušené díry rychlostí  $v_{vr}$  a vykonává současný pohyb ve směru osy díry axiální rychlostí  $v_{fa}$ . [1]

Nevýhodou je, že přesnost planetových brusek je menší, protože vřeteno planetových brusek nemá tak velkou požadovanou tuhost. [1]



Obr. 14. Vnitřní planetové broušení [1]

$v_{vř}$  – rychlost otáčení osy brousícího kotouče kolem osy brousící díry;  $v_c$  – obvodová rychlost kotouče

#### 1.2.9.5 Rovinné broušení

Z pravidla operace, která následuje po frézování je právě operace rovinného broušení, která obstará obrábění přídavku na opracování. Může se také použít i místo již zmiňovaného frézování a to při obrábění velmi tvrdých materiálů. [5]

Při broušení rovinných ploch rozeznáváme dva základní principy, které využívají přímočarého pohybu obrobku a to: [2]

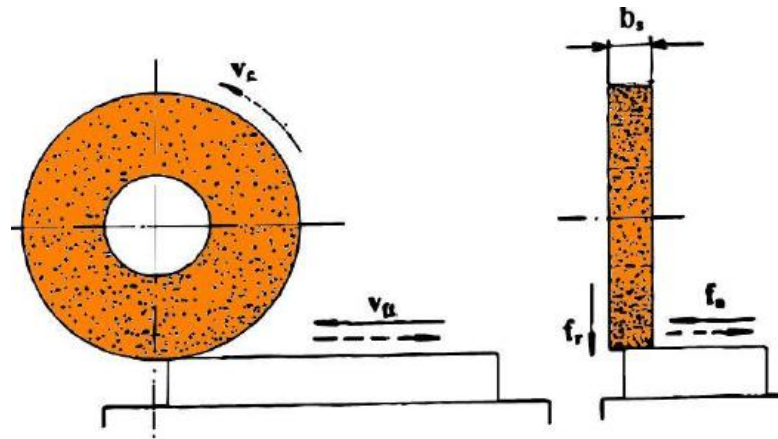
- Broušení rovinné obvodem kotouče
- Broušení rovinné čelem kotouče

#### 1.2.9.6 Obvodové broušení

Je to nejpřesnější metoda broušení ploch. Pracuje se relativně úzkým kotoučem, proto nevzniká tak vysoká nežádoucí teplota a deformace vlivem tepelných účinků jsou menší nebo jen nepatrné. [1]

Při broušení danou metodou se může obrobek buď otáčet, nebo i přímočaře posouvat. Zvolíme-li metodu přímočarého posuvu obrobku, otáčí se brousící kotouč obvodovou rychlostí  $v_c$  obrobek vykonává podélný vratný pohyb posuvovou rychlostí  $v_{ft}$ . V jedné nebo

obou úvratích se příčně posouvá kotouč vzhledem k broušenému dílu o hodnotu  $f_a$  a po skončení operace se radiálním posuvem  $f_r$  nastaví hloubka broušení opakovaně až po celkový přírůstek na broušení. [1]



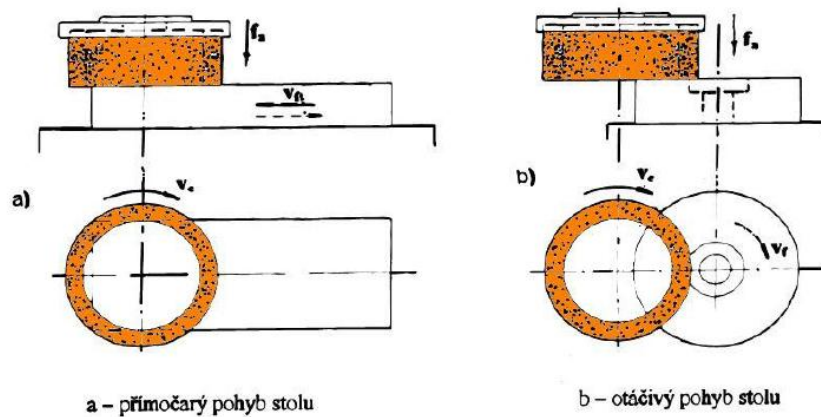
Obr. 15. Rovinné broušení obvodové – přímočarý pohyb stolu [2]

$f_a$  – axiální posuv stolu na otáčku obrobku;  $v_c$  – řezná rychlost;  $v_f$  – posuvová rychlost;  $v_{ft}$  – radiální rychlost posuvu stolu

### 1.2.9.7 Čelní broušení

Metoda čelního broušení není tak přesná jako metoda broušení obvodem kotouče, ale na druhou stranu je mnohem výkonnější. Při broušení se součást buď přímočaře posouvá, nebo koná otáčivý pohyb. [1]

U rovinných brusek lze sklonit vřeteno vzhledem k broušené ploše o několik stupňů (max. o  $4^\circ$ ), aby se styčná plocha nástroje a součásti zmenšila. Dojde ke zlepšení řezných podmínek, lépe se odstraňují třísky a dochází k lepšímu chlazení, ale dochází k horší k rovinnosti broušené plochy. [5]



Obr. 16. Rovinné broušení čelní [2]

$f_a$  – axiální posuv stolu na otáčku obrobku;  $v_c$  – řezná rychlost;  
 $v_f$  – posuvová rychlost,  $v_r$  – radiální rychlost posuvu stolu

### 1.2.9.8 Tvarové broušení

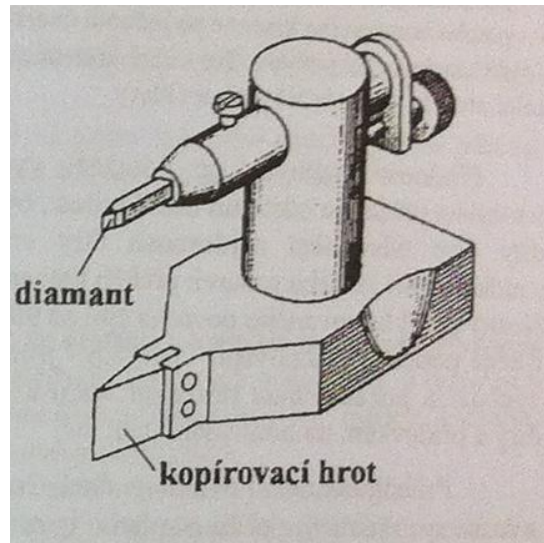
Mimo jednoduché procesy broušení rovinných, válcových, kuželových tvarů. Jsou potřeba také zmínit broušení ploch tvarových. Složitější tvary se zpravidla brousí dvěma způsoby a to: [5]

- **profilovými kotouči**
- **kotouči s obvyklým tvarem** přičemž pohyb, který tvoří požadovaný tvar pomocí šablony, vykonává brousící kotouč nebo součást. V případě se často využívá tvarové broušení pomocí číslicově řízených brusek (CNC brusky). [5]

Pro broušení složitějších tvarů se používají speciálně upravené (kopírovací) hrotové brusky, také brusky bezhrotou, rovinné brusky, speciální brusky, CNC brusky. [5]

Tvary na obvodu brousícího kotouče se vytvářejí kopírováním pomocí šablony a diamantu upnutého ve speciálně vyrobeném přípravku. [5]

Spodní část kopírovacího přípravku tvoří břit, který je veden po připravené šabloně. Aby bylo tvarování přesné je nutno dodržet, aby břit měl v kolmém průmětu shodný tvar jako diamant. Diamantem se připraví rýha v předem zvoleném brousícím kotouči a takto tvarovaným brousícím kotoučem se přenese daný tvar diamantu broušením na kopírovací hrot přípravku. [1]



Obr. 17. Schéma přípravku pro tvarování brousícího kotouče pomocí šablony [1]

### 1.3 Dokončovací metody obrábění

Dokončovací metody obrábění aplikujeme tam, kde jsou vyžadovány vysoké požadavky na kvalitu obráběného povrchu a jeho přesnost.

#### 1.3.1 Honování

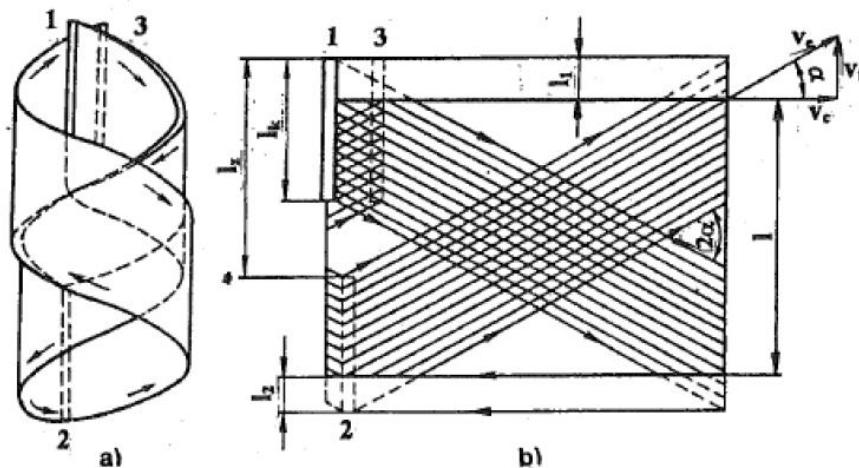
Jemné brusivo má za následek vysokou kvalitu obrobeného prvku, které se aplikuje při operaci zvané honování. Již jmenovaná operace se používá pro dokončování ložisek vřeten, pouzdra, bubny, válce spalovacích motorů. Pneumatické a hydraulické brzdové válce, apod. Materiály, které lze honovat jsou kalené i nekalené oceli, litiny, hliníkové slitiny, neželezné kovy, slinuté karbidy, tvrdé povlaky a různé materiály. [1]

Nejčastější použití je pro dokončování vnitřních válcových ploch. Vyrobit lze také průchozí i neprůchozí válcové díry, s drážkami různých tvarů a velikostí v rozsahu průměrů 1 až 750mm a délek až 24 m. Menší využití mají vnější válcové plochy. [1]

##### 1.3.1.1 Technologická charakteristika honování

Honování se vyznačuje a svou funkcí napodobuje broušení malou rychlostí jemným brusivem, vázaným v honovacích kamenech upevněným v honovací hlavě, při intenzivním použití řezných kapalin. Honovací kameny jsou k honovanému povrchu přitlačovány určitým tlakem. Při vnitřním honování vykonávají honovací kameny v díře složený šroubovitý pohyb, který je tvořen kombinací rotačního pohybu honovací hlavy s rychlostí

$v_c$  a posuvného vratného pohybu ve směru osy honování rychlostí  $v_f$ . Dráhy zrn brusiva se při tom společně překrývají a na honovaném povrchu se objevují charakteristické křížové stopy, které společně svírají úhel  $2\alpha$ . [1]



Obr. 18. Kinematika honovacího procesu [1]

*a* – pohyb honovacích kamenů; *b* – rozvinutá plocha honovaného povrchu; **1** – počáteční poloha honovacího kamene; **2** – poloha honovacího kamene v dolní úvrati; **3** – poloha honovacího kamene po jednom dvojdzvihu;  $v_c$  – řezná rychlost;  $v_f$  – posuvová rychlost;  $v_e$  – rychlost řezného pohybu;  $2\alpha$  – úhel křížení stop;  $l_1, 2$  – horní a dolní přeběh,  $l_z$  – zdvih honovací hlavy

Výhodou honování je dosažení vysoké přesnosti geometrického tvaru. Dá se jim odstranit různé nepřesnosti jako kuželovitost, soudkovitost, ovalitu, ale změnit polohu díry nelze. Požadujeme-li odstranění nepřesnosti díry ve směru její osy přeběh tak kamenů je třeba nastavit o 0,25 až 0,35 délky dané honovací hlavy. [1]

Nosný podíl honované plochy činí až 90%. [1]

Faktory ovlivňující řezné podmínky honování jsou honovaný materiál, výchozí a požadovaná přesnost tvaru a drsnosti povrchu, použitým brusivem, přídavkem na honování a průměr díry. [1]

Vysokou produktivitu honování a požadovanou jakost povrchu zajišťuje aplikace řezné kapaliny. Mezi používané směsi se řadí petrolej s olejem, nebo kyselinou olejovou. [1]

Podle požadované přesnosti povrchu rozlišujeme honování jednostupňové a honování dvoustupňové. [1]

Elektrolytické honování provádí se pomocí aplikace určitého elektrolytu, kdy se až 90% úběru materiálu realizuje jako elektrolytický proces. [1]

Vibrační honování probíhá za podmínek, kdy se na posuvový nebo rotační pohyb nástroje superporuje kmitavý pohyb o amplitudě 1 až 10 mm a frekvencí až 1500Hz. [1]

### **1.3.2 Lapování**

Dokončovací metoda při obrábění, kterou se dá dosáhnout nejvyšší rozměrové přesnosti a nejmenší drsnosti povrchu. Jeho použití se využívá pro dokončování rovinných, válcových a tvarových vnějších i vnitřních ploch. Lapují se funkční plochy měřidel, důležitá závitová spojení, ozubení, apod. [5]

Materiály, které lze aplikovat pro lapování jsou měkké i tvrdé materiály. Lapování se podobá zvláštnímu druhu broušení, k úběru materiálu dochází volným brusivem, které se přivádí mezi vzájemně se pohybující lapovací nástroj a obrobek. [1]

Rozlišujeme hrubovací, jemné a velmi jemné lapování. Při hrubovacím lapování dochází k odřezávání nerovností a výstupků lapovaného povrchu. K plastické deformaci povrchové vrstvy lapované plochy dochází při velmi jemném lapování. [5]

#### **1.3.2.1 Lapovací nástroje**

Mají negativní tvar lapovaných ploch. Vyrábějí se z jemnozrnné perlitické nebo feritické litiny, z mědi, měkké oceli, apod. Při velmi jemném lapování se můžeme setkat s nástroji z kalené oceli. Při ručním lapování se využívají lapovací desky pro lapování rovinných ploch, lapovací trny pro lapování děr a lapovací prstence pro lapování vnějších válcových ploch. [5]

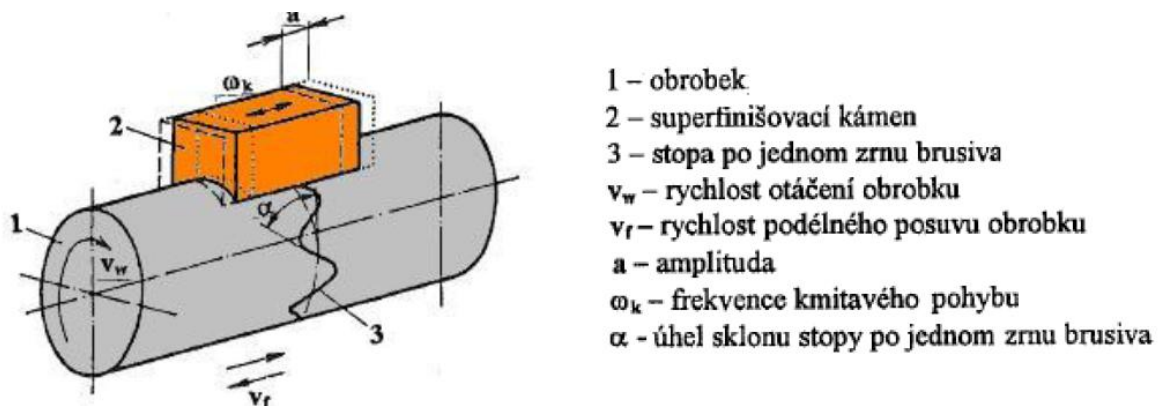
### **1.3.3 Superfinašování**

Vysoce produktivní metoda dokončovacího obrábění vnějších a vnitřních rotačních, tvarových a rovinných ploch. Největší uplatnění najde superfinašování při dokončování valivých ložisek a součástí automobilového průmyslu. Superfinašováním lze dokončovat kalené i nekalené oceli, litiny a plastů. [5]

Jako řeznou kapalinu při superfinašování, která má vyplachovací charakter se nejčastěji používá petrolej, Pro jemné superfinašování kdy se dosáhne skvělého lesku je vhodná kapalina s vyšší viskozitou (olej), při větším úběru je vhodné aplikovat kapaliny s nižší viskozitou (petrolej). [1]

Průběh superfinišování ovlivňuje především rychlost kmitavého pohybu, obvodová rychlost obrobku, velikost tlaku a viskozita řezné kapaliny. Superfinašování má dvě fáze a to hrubovací a leštící. [1]

Operace, která je vykonávána před superfinašováním je nejčastěji broušení, případně jemné soustružení, nebo i vyvrtávání. [1]



Obr. 19. Kinematické schéma superfinašování [1]

### 1.3.3.1 Superfinašovací nástroje

Používají se superfinašovací kameny s brusivem z umělého korundu a keramickou nebo bakelitovou vazbou pro superfinašování ocelí, z brusiva karbidu křemíku pro superfinašování litiny a ocelí nižších pevností. [5]

Kameny se do superfinašovacích hlav upevňují mechanicky nebo se lepí na ocelové podložky. [5]

## 1.4 Beztřískové metody dokončování obrobených povrchů

Spočívá v plastické deformaci povrchové vrstvy. Zmíněná deformace prochází do hloubky několika setin až desetin milimetrů, čímž dochází ke zlepšování parametrů struktury povrchu a ke zvýšení jeho pevnosti a tvrdosti. [1]

V povrchové vrstvě dochází ke vzniku tlakových napětí a dochází ke zvýšení mezí únavy, odolnosti proti opotřebení a odolnosti proti korozi. [1]

K beztřískovým metodám dokončování již obrobených povrchů patří válečkování, kuličkování a vyhlazování povrchu pomocí diamantu. [1]



### 1.4.1 Válečkování

Válečkováním se dokončují jak vnější, tak i vnitřní plochy. Při válečkování dochází k plastické deformaci a tím je zapříčiněno zahlazení nerovností předchozím obráběním. [5]

Při válečkování taktéž dochází ke zpevnění povrchových vrstev. [5]

Zvyšuje se:

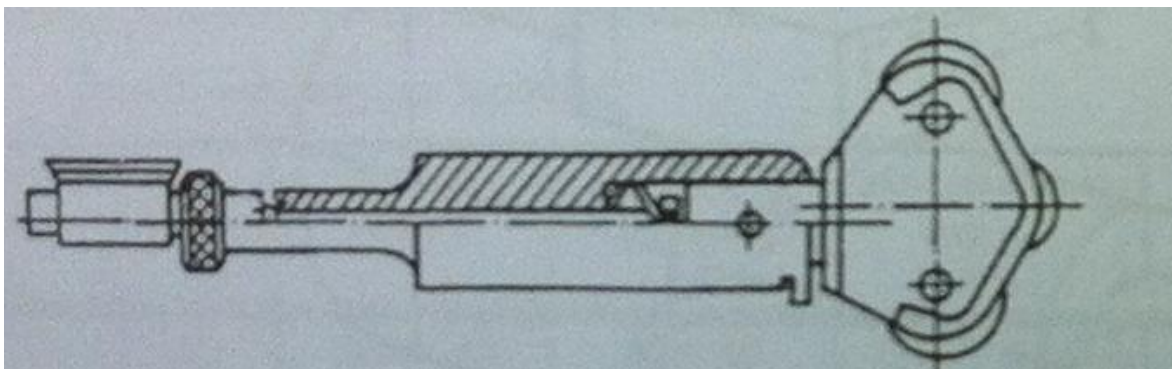
- Tvrdost
- Pevnost
- Mez únavy

Válečkování dělíme na:

- Statické
- Dynamické

Při statickém válečkování působí na dokončovanou plochu váleček, který se po dokončovaném povrchu odvaluje. Konečný efekt závisí na průměru aktivního povrchu válečku. Menší průměr zvyšuje hloubku zpevnění, větší průměry mají za následek dosažení povrchů s nižší drsností. [1]

Při dynamickém válečkování je povrch dokončované součásti deformován silovými impulzy tvářecích prvků, vyvozenými rotujícím trnem nebo kroužkem s vačkovými plochami. Technologické podmínky jako je posuv je nutno ověřit experimentálně. Výhodou dynamického válečkování je vyšší jakost zpevnění povrchové vrstvy. [5]

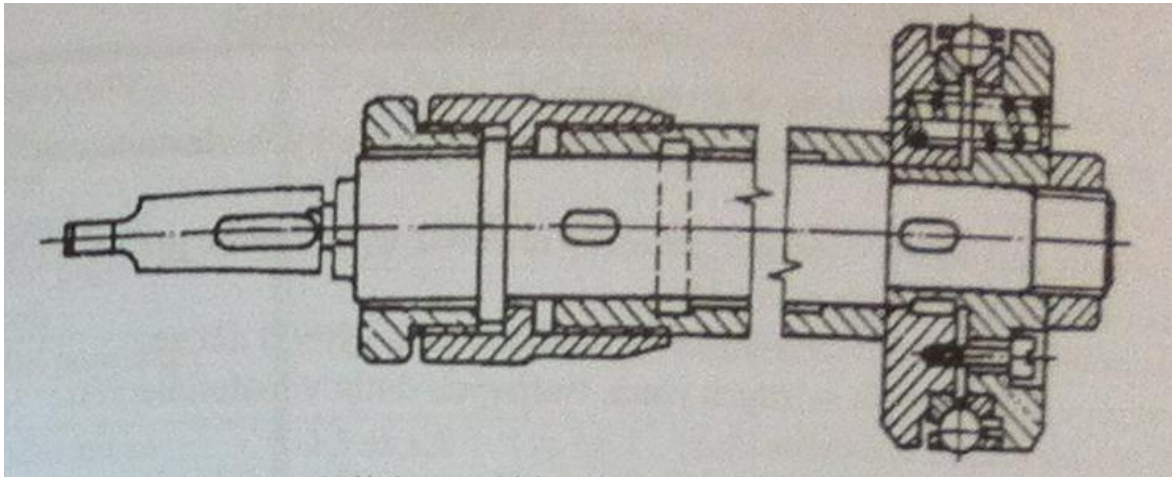


Obr. 20. Válečkovácí hlava pro statické válečkování vnějších válcových ploch [1]

Válečkováním dochází ke změně rozměru součásti o 0,01 až 0,03 a dochází k dosahování přesnosti od IT6 až IT 8. Drsnosti povrchu jsou v rozmezí  $Ra=0,1$  až  $0,3 \mu\text{m}$ . [1]

### 1.4.2 Kuličkování

Statické kuličkování je obdoba statického válečkování, ale místo válečků je nástrojem kulička, která se odvaluje po povrchu. [1]



Obr. 21. Kuličková hlava pro statické kuličkování děr [1]

Kuličkování se aplikuje pro dokončování vnějších i vnitřních rotačních ploch, tvarové plochy, rovinné plochy. [1]

Vzhledem k menší stykové ploše kuličky s povrchem je přitlačná síla menší, ale dochází ke kopírování nerovnosti povrchu. [1]

Na jednoduché operace se používají držáky s jednou kuličkou, vyšších výkonů se dosáhne s držákem s více kuličkami. Vnitřní válcové plochy se kuličkují stavitelnými rotačními trny, umožňují kuličkování v určitém rozsahu průměrů. [1]

Obvodová rychlost při kuličkování se volí v rozmezí od  $40$  až  $150 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , posuv na otáčku obrobku  $0,1$  až  $0,4 \text{ mm}$ . Jako mazivo se volí řezné a minerální oleje. Dosahovaná rozměrová přesnost povrchu je IT6 až IT 8, drsnost povrchu  $Ra=0,1$  až  $0,4 \mu\text{m}$ . [1]

#### 1.4.2.1 Dynamické kuličkování

Jeho použití se aplikuje pro zpevňování tvarově složitých součástí, při kterém se na dokončovaný povrch vrhá proud kuliček o průměru  $0,3$  až  $3 \text{ mm}$  z kalené oceli nebo bílé litiny rychlostí  $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Obdobou je tak zvaný **hydrofiniš**, kdy se na povrch aplikuje brusivo v proudu tlakové kapaliny. Místo brusiva lze použít skleněné kuličky, tzv. **balotiny** o průměru 0,03 až 0,8 mm, které jsou na povrch tryskány buď tlakovou vodou, nebo vzduchem. Dosahovaná drsnost povrchu  $Ra=0,8$  až  $1,6 \mu\text{m}$ . [1]

#### **1.4.2.2 Vibrační kuličkování**

Nachází uplatnění pro dokončování tvarově složitých součástí. Realizuje se nárazy kuliček na součásti umístěné v nádobě, které je udělen kmitavý pohyb ve třech směrech. [1]

#### **1.4.3 Ultrazvukové nárazové broušení**

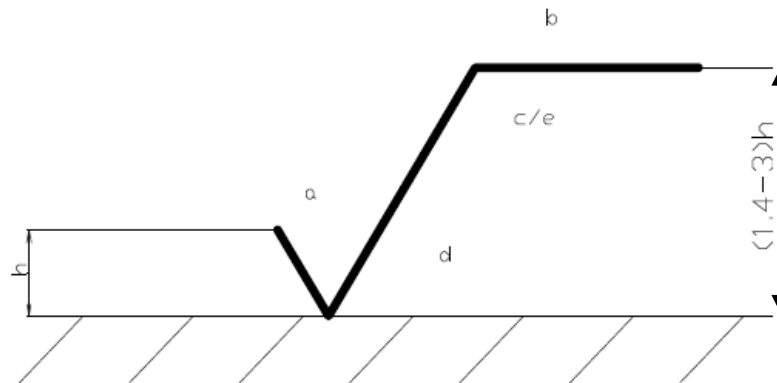
Podstatou metody je řízené rozrušování obráběného materiálu účinkem nárazu abrazivních zrn, která se nachází mezi obrobkem a kmitajícím nástrojem ultrazvukovou frekvencí. [1]

Frekvence se pohybuje v mezích od 20 až 30 kHz, amplituda kmitání se pohybuje v mezích od 25 až 90  $\mu\text{m}$ . [1]

Proces úběru materiálu je společným důsledkem mechanického účinku abraziva a kavitačního účinku. Velká kinetická energie zrn abraziva způsobuje narušování celistvosti obráběného povrchu, kavitační účinky pak umožňují rychlou výměnu opotřebovaných zrn za nové. [1]

Kapalné prostředí umožňuje lepší pronikání ultrazvukové energie do místa obrábění. Kapalné prostředí je nejčastěji tvořeno vodou, benzínem, olejem apod. [1]

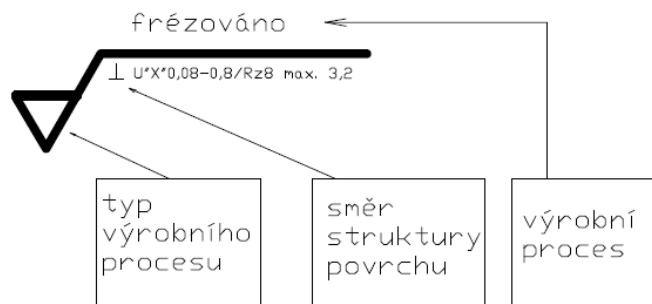
## 1.5 Označování struktury povrchu



Obr. 22. Obecné zobrazování struktury povrchu [1]

- a) jedná se o hodnotu drsnosti  $R_a, R_z$
- b) popisuje se zde výrobní proces (např. frézování)
- c) dolní a horní stanovení meze U nebo I, typ filtru, okno filtrace
- d) popisuje směr struktury povrchu
- e) parametr dané struktury povrchu, vyhodnocovaná délka, mezní hodnota

Drsnost povrchu je nutné předepisovat pro všechny plochy obrobku kromě ploch, pro které předpis drsnosti není nutný. [1]

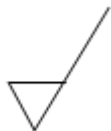


Obr. 23. Příklad označování struktury povrchu v technické dokumentaci [1]

K označení povrchu se používá různých druhů značek:



Používá se v případě, že požadovaná drsnost nezávisí na způsobu konečného zpracování. [1]



Používá se v případě má-li být požadovaná drsnost dosažena pouze obráběním. [1]



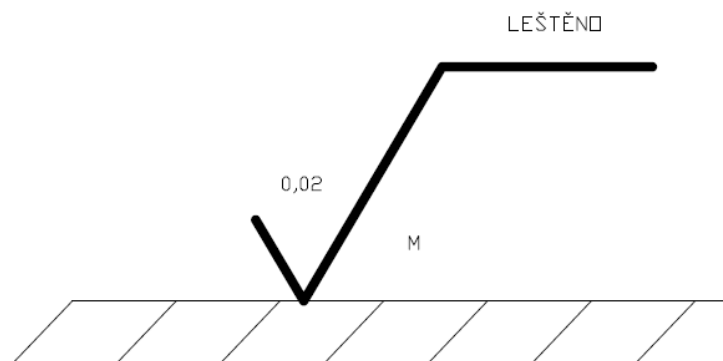
Požadovaná drsnost se dosáhne při konečném zpracování bez odebrání materiálu, povrch nesmí být obráběn. [1]

Číselná hodnota drsnosti povrchu podle normy ČSN 01 4451 se aplikuje za příslušnou značku, pouze mimo hodnotu Ra se uvádí bez této značky [1]

Při předpisu drsnosti povrchu rozsahem daných číselných hodnot se v označení mezní hodnoty uvedou ve dvou řádcích tak, že v horním řádku se aplikuje hodnota větší, např.: [1]



Je-li za nutné uvést i značku směru nerovnosti povrchu. Způsob konečného zpracování se uvádí v označení drsnosti povrchu, jen pokud je to požadováno. [1]



Obr. 24. Příklad označení drsnosti povrchu [1]

## 1.6 Přesnosti dosahované vybraným způsobem dokončovací operace

Metoda obrábění		Přesnost rozměru IT		Drsnost plochy R <sub>a</sub> [μm]	
		<i>střední</i>	<i>rozsah</i>	<i>střední</i>	<i>rozsah</i>
Vnější rotační plochy	<b>Broušení</b>				
	<i>hrubování</i>	10	9 až 11	1,6	0,8 až 3,2
	<i>dokončování</i>	5	5 až 6	0,4	0,2 až 0,6
	<i>jemné</i>	4	3 až 5	0,2	0,05 až 0,6
	<b>Lapování</b>				
	<i>normální</i>	4	3 až 4	0,1	0,05 až 0,2
	<i>jemné</i>	2	1 až 2	0,05	0,012 až 0,05
	<b>Superfinišování</b>				
	<i>dokončování</i>	4	3 až 5	0,2	0,05 až 0,4
	<i>jemné</i>	3	2 až 4	0,1	0,025 až 0,1
Vnitřní rotační plochy	<b>Vnitřní broušení</b>				
	<i>hrubování</i>	9	9 až 11	1,6	1,6 až 3,2
	<i>dokončování</i>	7	5 až 7	0,8	0,4 až 1,6
	<i>jemné</i>	5	3 až 6	0,2	0,05 až 0,4
	<b>Honování</b>				
	<i>hrubování</i>	7	6 až 8	0,4	0,2 až 0,8
	<i>dokončování</i>	6	5 až 7	0,2	0,1 až 0,2
	<i>jemné</i>	4	3 až 5	0,1	0,05 až 0,1
	<b>Lapování</b>				
	<i>dokončování</i>	4	3 až 5	0,2	0,01 až 0,4
	<i>jemné</i>	3	1 až 3	0,05	0,012 až 0,05
Rovinné plochy	<b>Broušení</b>				
	<i>hrubování</i>	10	9 až 11	1,6	1,6 až 3,2
	<i>dokončování</i>	7	5 až 7	0,8	0,4 až 1,6
	<i>jemné</i>	5	3 až 6	0,2	0,05 až 0,4
	<b>Lapování</b>				
	<i>dokončování</i>	4	3 až 5	0,2	0,1 až 0,4
	<i>jemné</i>	3	1 až 3	0,05	0,012 až 0,05

Obr. 25. Abrazivní metody broušení [1]

## 2 PARAMETRY HODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU

### 2.1 Jakost povrchu

Dodržení předepsané jakosti povrchu patří mezi nejvýznamnější úkoly technologie výroby. Jakost je pojem, který v sobě zahrnuje jak geometrickou tak i rozměrovou přesnost, ale mimo jiné taky vlastnosti povrchové vrstvy a změny, které nastávají v dané povrchové vrstvě. Každá funkční plocha, která podléhá aplikaci technologické operace má svou specifickou jakost, tj. tvar, drsnost, rozměr.

#### Hodnocení jakosti-**objektivní hodnocení**

- komparační
- přímé-kontaktní
- přímé-bezkontaktní

#### Hodnocení jakosti-**subjektivní**

- Barva
- vzhled

Drsnost povrchu je ovlivněna hlavně hloubkou třísky, řeznou rychlostí, velikostí posuvu, ale velký vliv na drsnost povrchu má taky mimo jiné volba použité technologie, kterou se bude povrch obrábět např. volbou nástroje a jeho předepsané geometrie, způsobem řezání a typem pohybů. Profil drsnosti povrchu je vytvářen odběrem třísky obráběcím materiálem a nepravidelnostmi, způsobena určitou drsností povrchu nástroje, lomy částic materiálu, změny na nástroji, lomy a opotřebení nástroje, tvrdé částice třísky, které abrazivně působí na obráběný povrch. [7]

### 2.2 Základní ČSN EN ISO normy popisující strukturu povrchu

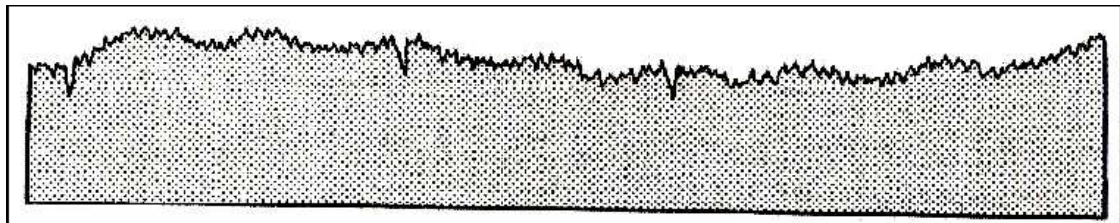


Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu	ČSN EN ISO 4287  01 4450
Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu	ČSN EN ISO 4288  01 4449

Obr. 26. Normy týkající se struktury povrchu [7,8]

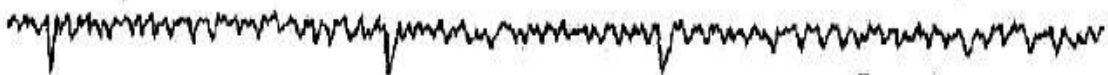
### 2.3 Základní pojmy a definice

Strukturou povrchu se rozumí určitý úsek geometrických úchylek skutečného povrchu s poměrně malou vzdáleností za sebou jdoucích nerovností. [8]



Obr. 27. Skutečný profil povrchu [8]

**Mikronerovnost-** Jedná se o jemnou nerovnost (drsnost povrchu) – je dána stopami, které za sebou zanechává, např. brusný kotouč. [8]



Obr. 28. Jemná nerovnost (drsnost povrchu) [8]

**Makronerovnost-** Po povrchu rozlehlejší periodická nerovnost (vlnitost povrchu ) – nejčastěji způsobené vibrační soustavy *Stroj - Nástroj - Obrobek – Prostředí*



Obr. 29. Vlnitost povrchu [8]

**Tvar-** Základní obecný tvar povrchu při vyloučení vlnitosti a drsnosti (jmenované úchytky mohou být zapříčiněny špatnou přímostí vodících ploch, nedostatečnou tuhostí, nebo teplem vzniklým během výrobního procesu, při kterém může dojít k úplné deformaci obráběných ploch). [25]



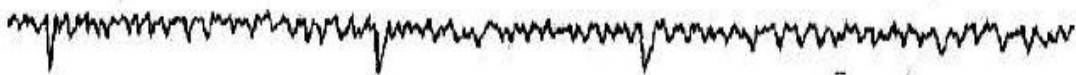
Obr. 30. Obecný tvar povrchu [8]

**Vlnitost-** Je určitá část textury, na které je aplikována (vytvořena) drsnost. To může být zapříčiněno nežádoucími účinky jako je chvění, zpevněním materiálu, deformací obrobku (v praxi je považována za vliv stroje, např. nevyváženosti brousícího kotouče, nepřesnosti vodících částí, nebo malou tuhostí). [8]



Obr. 31. Vlnitost povrchu [8]

**Drsnost-** Jedná se o nepravidelnosti, které jsou důsledkem výrobních procesů (je to výsledek vzájemného relativního pohybu vykonávaný mezi obrobkem a nástrojem). Mimo jiné je povrch ovlivněn především mechanismem tvoření třísky, což se projeví například vytrháváním částic materiálu a to hlavně ovlivní náhodný charakter povrchu. [25]



Obr. 32. Drsnost povrchu [8]

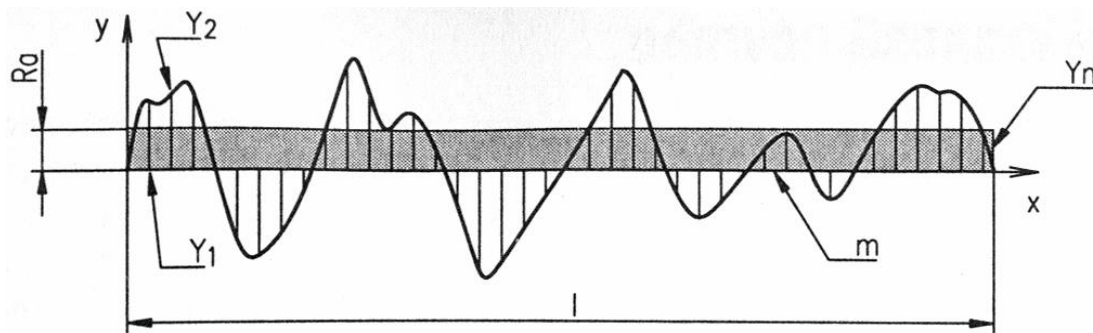
## 2.4 Definice parametrů profilu nerovností

Dělí se do následujících skupin:

- **Amplitudové** (výškové) parametry, které určují pouze velikost vrcholů nebo prohlubní, resp. Obojí, bez ohledu na rozteč (např.  $R_a$ ) [8]
- **Frekvenční** parametry (v podélném směru), které se určují pouze při roztečích nepravidelností podél plochy (např. Průměrná šířka prvků profilu  $R_{sm}$ ) [8]
- **Hybridní** parametry, které jsou určeny kombinací amplitudy a rozteče (např. střední vlnová délka). [8]

### 2.4.1 Výškové parametry (výstupky a prohlubně)

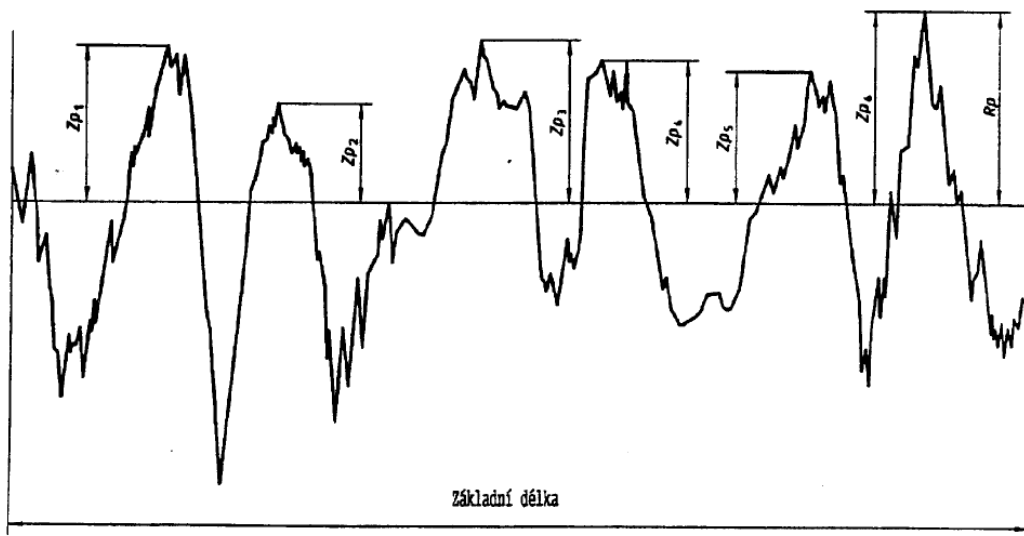
#### 2.4.1.1 Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )

Obr. 33. Posuzování drsnosti profilu  $R_a$ 

**$R_a$**  - průměrná aritmetická hodnota posuzovaného profilu je aritmetický průměr absolutních hodnot úchylek profilu v rozsahu základní délky [ $\mu\text{m}$ ].

#### 2.4.1.2 Největší výška výstupku profilu, $P_p$ , $R_p$ , $W_p$ :

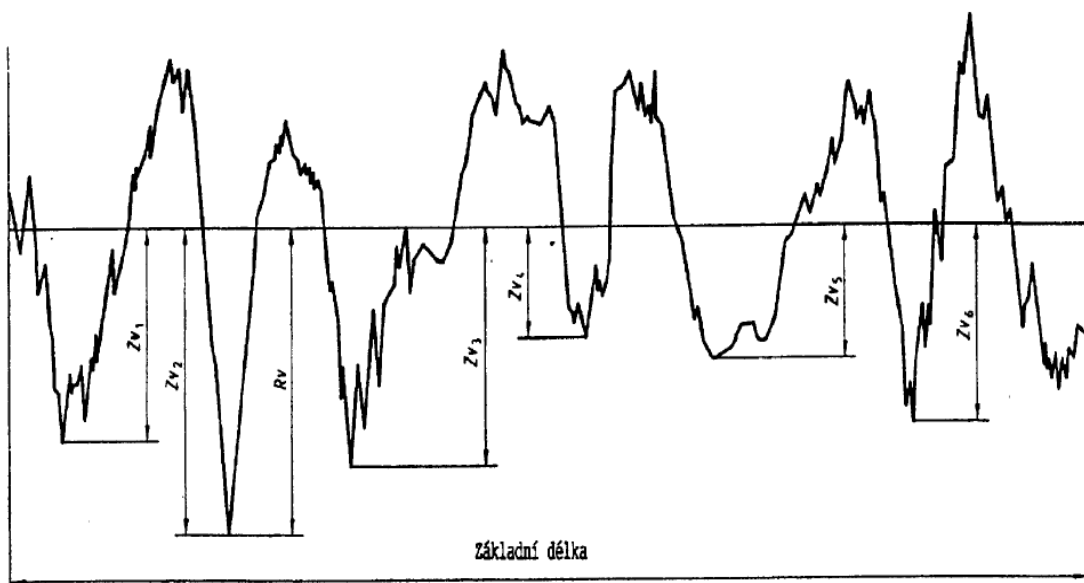
Jedná se o výšku  $Z_p$  největšího výstupku profilu v rozsahu dané základní délky (viz obrázek 34) [7]



Obr. 34. Největší výška výstupků profilu (příklad profilu drsnosti) [7]

#### 2.4.1.3 Největší hloubka prohlubně profilu, $P_v$ , $R_v$ , $W_v$ :

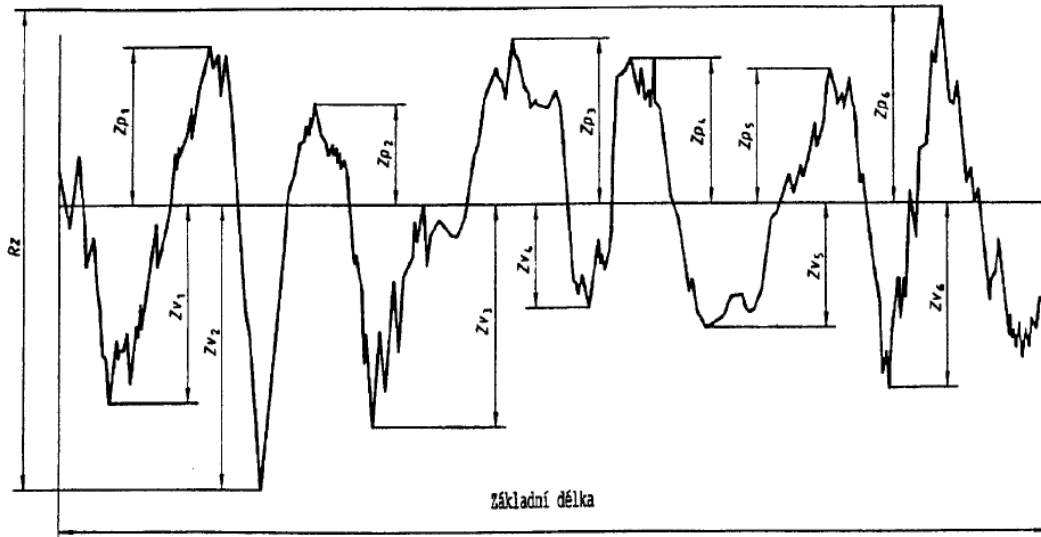
Je to hloubka  $Z_v$  prohlubně která je nejnižší na daném profilu v rozsahu délky základní (viz obrázek 35) [7]



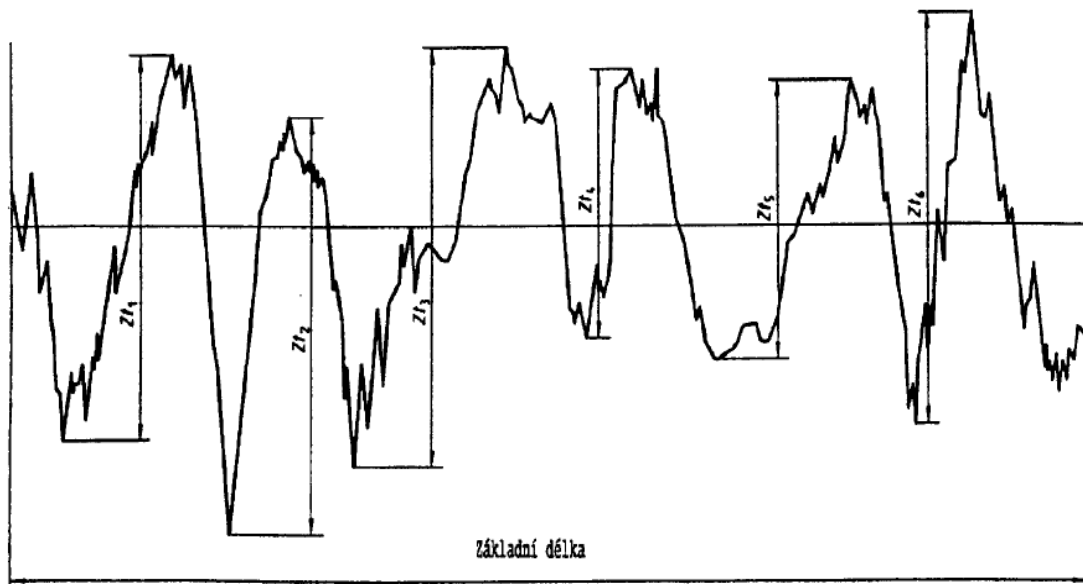
Obr. 35. Největší hloubka prohlubně profilu (příklad profilu drsnosti) [7]

#### 2.4.1.4 Největší výška profilu, $P_z$ , $R_z$ , $W_z$ :

Jedná se o součet výšky  $Z_p$  nejvyššího výstupku profilu a hloubky  $Z_v$  prohlubně která je nejnižší na daném profilu v celém rozsahu základní délky (viz obrázek 36) [7]



Obr. 36. Největší výška profilu (příklad profilu drsnosti) [7]

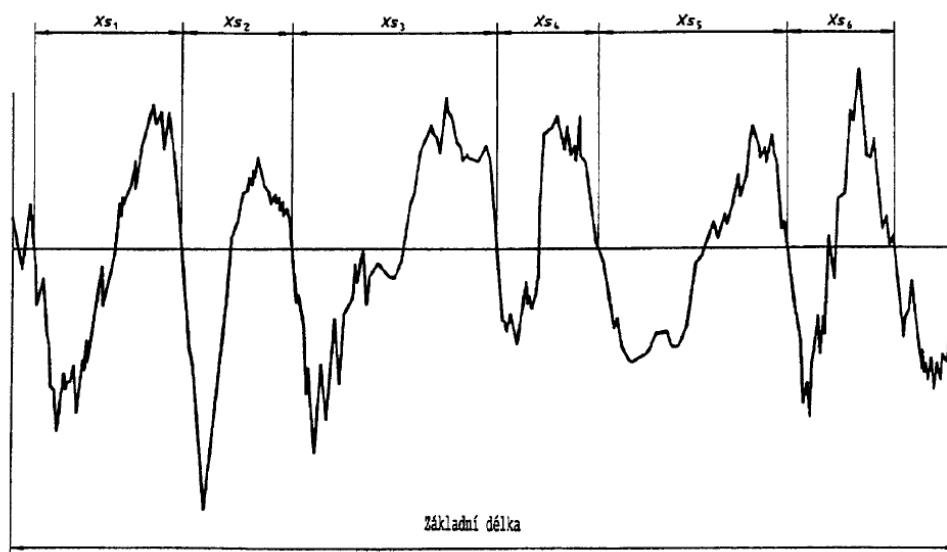


Obr. 37. Průměrná výška prvku profilu (příklad drsnosti povrchu) [7]

## 2.5 Délkové parametry

### 2.5.1 Průměrná šířka prvků profilu $R_{sm}$

Jedná se o **frekvenční** parametr a je to aritmetický průměr šířek  $X_s$  prvků profilu v rozsahu základní délky. [8]



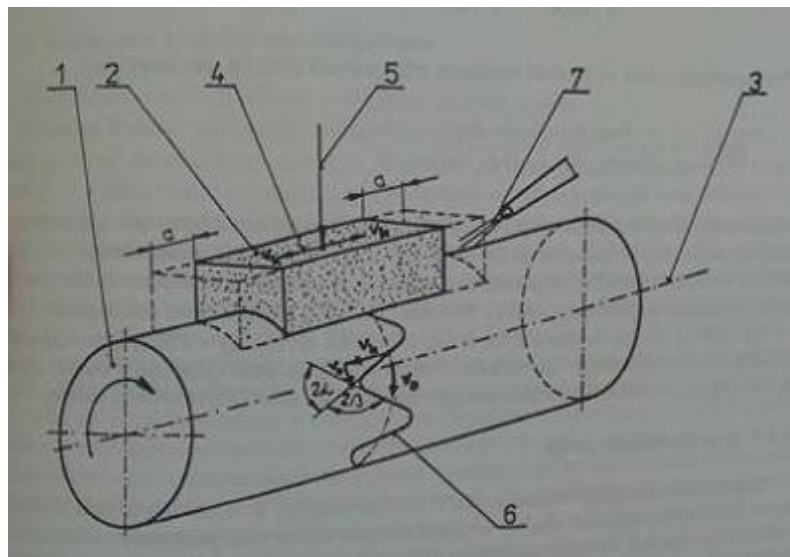
Obr. 38. Šířka prvku profilu [8]

### 3 TEORETICKÉ ZÁVISLOSTI DRSNOSTI POVRCHU NA ŘEZNÝCH PARAMETRECH ZEJMÉNA S ORIENTACÍ NA SUPERFINIŠOVÁNÍ

#### 3.1 Kinematika superfinišování

Popišme kinematické poměry superfinišování jen při základním kmitavém pohybu nástroje a rotačním pohybu obrobku. Takový případ nastává při hrotovém zápichovém superfinišování. Kinematické poměry zahrnují v sobě otázky tvaru dráhy vybraného hrotu nástroje (vybraného superfinišovacího zrnka), jeho geometrických charakteristik (úhlů dráhy s vyznačenými směry) i kinematických veličin (rychlostí i frekvencí amplitud) pohybů při superfinišování. [10]

Vzhledem na zvolený rozebíraný způsob superfinišování (hrotovém zápichovém superfinišování), tvar dráhy řezného pohybu je sinusoida (viz. obrázek). Se směrem kmitavého pohybu nástroje svírá úhel  $\alpha$ , se směrem otáčivého pohybu svírá úhel  $\beta$ . [10]



Obr. 39. Princip superfinišování [10]

1 – obrobek, 2 – superfinišovací kámen, 3 – osa otáčení obrobku,  
4 – oscilační pohyb, 5 – přítlak superfinišovacího kamene, 6 –  
stopa po jednom brusném zrně, 7 – proplachovací kapalina

Průměrná rychlost základního kmitavého pohybu nástroje bude:

$$v_s = \frac{4av}{1000} = \frac{4Av}{1000} \quad (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$$

kde  $a$  je amplituda základního kmitavého pohybu (mm),

$v$  je frekvence základního kmitavého pohybu ( $\text{min}^{-1}$ ),

$A$  je dvojnásobná amplituda základního kmitavého pohybu (mm). [10]

Obvodová rychlost obrobku bude:

$$v_n = \frac{\pi D_w n_w}{1000} \quad (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$$

kde  $D_w$  je průměr obrobku (mm),

$n_w$  je frekvence otáčení obrobku ( $\text{min}^{-1}$ ),

Při superfinišování je obtížné určit, jestli hlavní pohyb je kmitavý pohyb nástroje nebo otáčivý pohyb obrobku, nebo můžeme pracovat aj s  $v_s > v_w$  a taky  $v_s < v_w$ , proto superfinišování budeme charakterizovat výslednou řeznou rychlostí  $v_e$ .

$$v_e = \sqrt{v_n^2 + v_w^2} = \sqrt{\left(\frac{2Av}{1000}\right)^2 + \left(\frac{\pi D_w n_w}{1000}\right)^2} = \sqrt{\frac{4A^2 v^2 + \pi^2 D_w^2 n_w^2}{1000}} \quad (\text{m} \cdot \text{min}^{-1}),$$

Při superfinišování se za úhel zkřížení stop pokládá úhel  $2\beta$ , pro který platí:

$$\text{tg}\beta = \frac{v_s}{v_n} = \frac{4 \cdot a \cdot v}{\pi \cdot D_w \cdot n_w} = \frac{4 \cdot A \cdot v}{\pi \cdot D_w \cdot n_w}$$

Již jmenovaný úhel zkřížení stop po superfinišování je velmi důležitý pro samotný proces superfinišování. Jak je tento úhel velmi malý ( $2\beta < 15^\circ$ ), převládá zalešťování vrcholů a dochází k poklesu fyzikálních parametrů opracované plochy. Při úhlu  $2\beta = 20 - 60^\circ$  nastane dokončování, při úhlu  $2\beta = 60 - 90^\circ$  nastane hrubování. Jak je úhel příliš velký ( $2\beta > 120^\circ$ ), převládá superfinišování volným zrnem a dochází k poklesu geometrických parametrů opracované plochy. [10]

### 3.2 Dosahované výsledky superfinišování

Při superfinišování se používají následující hodnoty veličin:

Průměrná rychlost základního kmitavého pohybu nástroje bývá  $v_s = 7 - 30 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,

obvodová rychlost obrobku bývá  $v_w = 15 - 30 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . Měrný tlak superfinišovacích

kamenů bývá  $0,2 - 1,5 \text{ MPa}$ . Pracovní proces superfinišování je velmi krátký ( $6 - 60$



sekund). Příklad na opracování bývá 3 až 10  $\mu\text{m}$  (na průměr). Úběr (hloubka odebrané vrstvy) při superfinišování se nedá nastavit. Nastavuje se řezná síla. Úběr se musí vypočítat. V počátku procesu superfinišování se kámen zaběhává, to trvá několik málo sekund, po kterých úběr roste. V prvních sekundách (kámen je zaběhnut již při 2 sekundách) je rychlost úběru největší i největší úbytek drsnosti, i největší rychlost opotřebení superfinišovacího kamene. Úběr postupně klesá, ale nezastaví se stabilizuje se (rychlost úběru konstantní). Vstupní drsnost do procesu superfinišování nemá být ani příliš velká a ani příliš malá (obojí je nevhodné, u prvního případu pro superfiniš, u druhého případu u předchozích operací). Nejvhodnější se jeví  $R_a = 0,3 - 0,4 \mu\text{m}$ . [10]

Superfinašování je možné dosáhnout drsnost povrchu obdobnou lapování za předpokladu, že použijeme také jemné superfinašovací kameny, jako jsou zrnité příslušné lapovací pasty. Běžná dosahovaná drsnost při superfinašování je  $R_a = 0,08 - 0,12 \mu\text{m}$ . Taky přesnost rozměrů a tvarů je vysoká a můžeme uvažovat i o stupnici přesnosti IT 1. Superfinašování vyžaduje od předchozích operací některé hodnoty (hranatost apod.) už takřka v konečných hodnotách. Superfinašování není operace na vylepšení nedostatků po předchozích operacích a vyžaduje dobrou technickou disciplínu. Superfinašování jako nejvhodnější proces dokončovacího obrábění je také výhodné, že výrobu některých součástek (např. součástek valivých ložisek) si jinak jako superfinašování nedokážeme představit. [10]

## 4 PŘEHLED METOD MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU

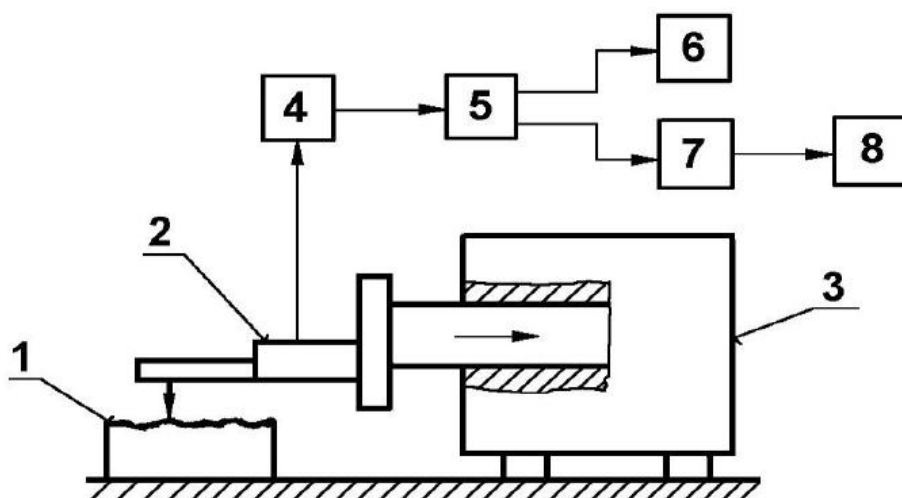
Drsnost povrchu se měří následujícími metodami

### 4.1 Hodnocení kvalitativní

Při tomto hodnocení drsnosti povrchu je měření závislé na lidském faktoru. Daný povrch je porovnáván hmatem, zrakem, nebo pomocí optických pomůcek se vzorovými plochami. Kvalita měření silně závisí na rozlišovací schopnosti lidských smyslů a vlastnostmi fyzikálními aplikovaných pomůcek – např. mikroskopů. Při použití světelného mikroskopu je rozlišovací schopnost přibližně  $1 \mu\text{m}$ . U hmatu lze rozlišit rozdíl v drsnosti  $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ . [12]

### 4.2 Hodnocení drsnosti povrchů dotykovými profilometry

Aplikací touto metodou měření dochází k porovnávání plochy kontrolované s plochou vzorovou (etalonovou) měřidly zvanými jako komparační. Získaný výsledek je rozdíl drsnosti porovnávaných povrchů. Skupinu měřidel, kterou tvoří tato skupina patří kompenzátory pneumatické, mechanické, elektrické a fotoelektrické. Již uvedená metoda nám umožňuje číselné zjištění hodnot jednotlivých parametrů drsnosti povrchů a je ji možno použít pro moderní spektrální a statická vyhodnocení nerovnosti povrchu.



Obr. 40. Dotykový profilometr [11]

Popis obr. 1.

- 1 – Měřená součást
- 2 – Hlavice snímací s měřicím hrotem
- 3 – Posuvový mechanismus
- 4 – Zesilovač
- 5 – Filtr
- 6 – Registrační jednotka
- 7 – Jednotka zpracovávající měřicí signál
- 8 – Zobrazovací jednotka

### **Stručný popis zařízení:**

#### **Mechanická část:**

- stolek, na niž se aplikuje měřená součást,
- Snímací hrot s ramenem, které se pohybuje konstantní rychlostí a snímací, který hrot snímá nerovnosti povrchu,
- vratný pohyb přímočarý je zajištěn elektromotorem, nebo pneumaticky.

#### **Elektronická část:**

- která transformuje signál mechanický je vygenerovaný pomocí snímacího hrotu, který sleduje nerovnosti povrchu, měřené plochy převádí na elektrický signál, který je zpracovává (číselná hodnota příslušného parametru drsnosti nebo grafický záznam nerovnosti povrchu).

Převodníky pracují na piezoelektrickém principu, magnetoelektrickém, indukčním popřípadě interferometrickém s využitím laseru (bezdotykové snímání).

Za měřicí základnu se považuje buď přesná přímá (nebo tvarová) dráha snímače – snímání absolutní (přednostně dle ČSN EN ISO 4287), nebo dráha generovaná opěrnou patkou klouzající po měřeném povrchu – snímání relativní.

Je nutné, aby pohyb snímacího hrotu byl velmi přesný co do přímosti a rovnoměrnosti. Rychlost musí být volena s ohledem na dynamické vlastnosti snímacího systému (nepoškození povrchu, věrné snímání nerovnosti). Profil je silně ovlivňován vlastnostmi snímacího systému. [11, 12]

#### **Faktory ovlivňující správnost výsledků měření:**

- poloměr zaoblení snímacího hrotu (2  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ ),
- úhel vrcholový snímacího hrotu (60°, 90°),
- měřicí síla (cca 0,00075 N),
- rychlost změny měřicí síly,
- poloměr zaoblení kluzné patky snímače (u relativní metody),

- celkové geometrické uspořádání systému snímače. [11, 12]

### Porovnávací metoda kontroly s etalony drsnosti

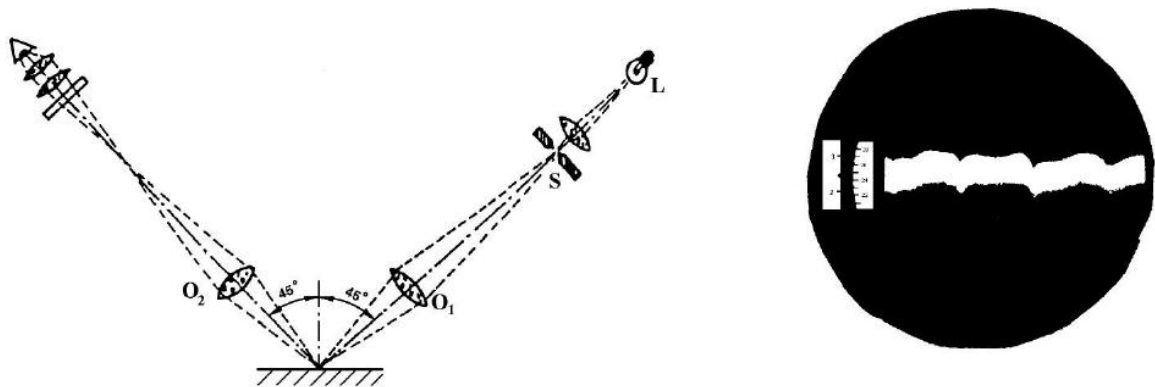
Metoda již je založena na porovnávání drsnosti povrchu součásti s drsností etalonů buď pouhým okem, nebo pomocí mikroskopu, nebo optického komparátoru. Při tomto měření je nutno dodržet následující podmínky:

- materiál etalonu a měřené součásti by měl být stejný (alespoň co se týče barvy),
- totožný tvar povrchu etalonu a měřené součásti (vypuklý, vydutý, plochý),
- povrch etalonu a součásti byl získán stejným způsobem obrábění,
- stejné podmínky posuzování (osvětlení).

Značnou nevýhodou je, že přesnost této metody je velmi nízká. [11, 12]

### 4.3 Metoda měření pomocí světelného řezu

Při aplikaci měření již jmenovanou metodou se používá nejčastěji dvojitý mikroskop Schmaltz.



Obr. 41. Metoda světelného řezu – princip a obraz v okuláru [11]

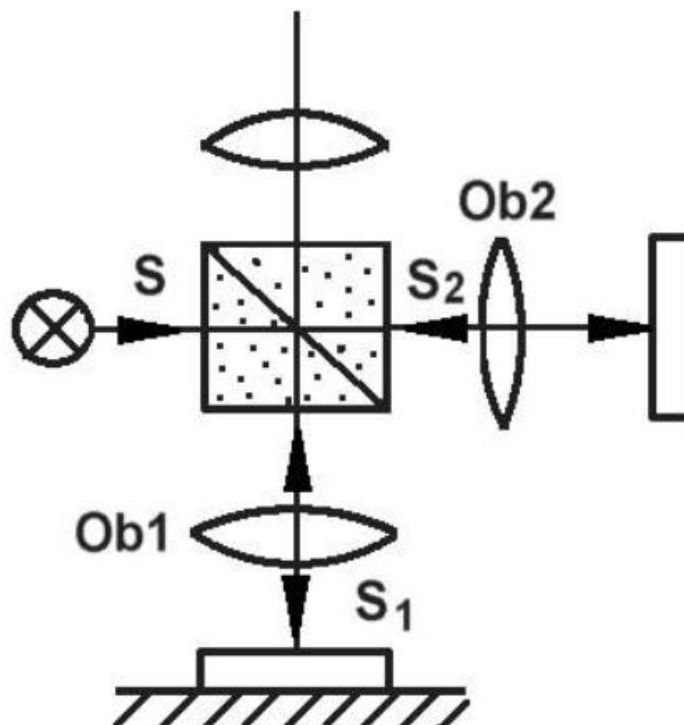
Svazek paprsků, který je rovnoběžný je omezen štěrbinou ve tvaru velmi tenké světelné roviny a je promítán pomocí optického systému pod úhlem  $45^\circ$  na měřený povrch.

Pronikem této roviny nerovnostmi povrchu vznikne obraz profilu šikmého řezu nerovnosti plochy, který má nejčastěji tvar světlozelené stužky v tmavém poli mikroskopického obrazu (obr. č. 11). Tyto dvojitý mikroskopy umožní volbu zvětšení výměnou objektivu a okuláru. Rozsah použití těchto měřicích mikroskopu je značně omezen. [11, 12]

#### 4.4 Měření s použitím interference světla

Princip měření interferenčním mikroskopem viz obr. č. 12.

- paprsek S vychází ze zdroje světla na polopropustné zrcadlo vytvořené ve skleněném hranolu a tam se rozdělí na dva dílčí paprsky,
- paprsek S1 putuje na povrch měřené součásti a zpět,
- paprsek S2 putuje na odrazné zrcadlo, kde se odrazí zpět,
- oba tyto dílčí paprsky se spojují (interferují) a směřují do okuláru mikroskopu,
- jsou kladeny vysoké požadavky na shodnost obou objektivů Ob1, Ob2,
- vzniklé interferenční proužky je možné sledovat v okuláru přístroje,



Obr. 42. Interferenční mikroskop [11]

- ideálně rovné plochy vykazují stejnoměrné rovnoběžné pruhy,
- vyskytují-li se na povrchu rýha a jiné poškození, projeví se na interferenčním obraze vychýlení proužků v tomto místě,
- vzdálenost proužků odpovídá změně klínové vrstvy o  $\lambda/2$  při kolmém dopadu světla a velmi malém úhlu klínu,
- známe-li vychýlení proužků  $\Delta L$  a vzdálenost interferenčních proužků
- L pak velikost nerovnosti určíme dle vztahu:

$$R = \frac{\Delta L}{L} * \frac{\lambda}{2}$$

-kde:  $\lambda$  ...je vlnová délka aplikovaného světla

- pro získání ostřejších proužků, používáme vícepaprskové interference



Obr. 43. Obraz v okuláru přístroje [11]

### Měřicí přístroje dotykové

Dotykový měřicí přístroj je dle normy ČSN EN ISO 3274 definován jako přístroj, který zkoumá dané povrchy hrotem snímacím, a získává tím úchytky ve formě profilu povrchu, vypočítává parametry a je zároveň schopen tento profil zaznamenat.

Mezi nejdůležitější části přístroje patří měřicí smyčka. To jest uzavřený řetězec, který zahrnuje všechny mechanické části propojující měřený objekt a snímací hrot. Jsou to prostředek polohování, upínací přípravek, měřicí stojan, posuvová jednotka a snímací hlava. Smyčka je vystavena vnějším a vnitřním poruchám. Vliv na jmenované poruchy má individuální nastavení měřicího zařízení, měřicí prostředí a uživatel, který obsluhuje přístroj. [12, 13]

### Měřicí hroty

Jestli dojde při měření k zachycení celého tvaru nerovností až na úplné dno největších prohlubní, závisí hlavně na geometrii hrotu (tj. na poloměru kulového zakončení hrotu a na jeho vrcholovém úhlu). Hrot má být přitlačován k povrchu takovou silou, aby při pohybu snímače byla jeho špička v neustálém styku s měřeným povrchem.

Podle normy ČSN EN ISO 3274 je za ideální tvar pro snímání považován hrot kužel s kulovou špičkou. Jeho jmenovitý poloměr zaoblení špičky je 2  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$  nebo 10  $\mu\text{m}$  a úhel kužele je 90° nebo 60°. [12]

#### 4.4.1 Postupy a pravidla pro kontrolu dotykovými přístroji

Před měřením je nezbytně nutné určit mezní vlnovou délku cut-off  $\lambda_C$ . Tato délka je rovna délce základní, ta je specifikována na výkrese či výrobní dokumentaci. Pokud není tato délka specifikována, je nutno ji zvolit dle následujícího postupu měření:

- Před měřením je nutné rozhodnout, zda se jedná o periodický či neperiodický profil.
- U neperiodického profilu je nutné odhadnout neznámý parametr profilu drsnosti (tj.  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{z1max}$ ,  $R_{Sm}$ ) a to libovolným způsobem, např.: vizuální kontrola, srovnání pomocí srovnávacích vzorků, apod. Dle tabulek č. 1, 2, 3 se odhadne základní délka pro dané odhadnuté parametry.
- Na měřicím přístroji nastavíme odhadnutou základní délku a aplikujeme reprezentativní měření parametrů  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{z1max}$ ,  $R_{Sm}$ . Získané hodnoty se porovnávají s rozsahem hodnot pro danou základní délku podle tabulek. Pokud nejsou hodnoty v souladu s rozsahem, provede se změna nastavení základní délky; a to na kratší, případně větší délku. Získané hodnoty se porovnají s rozsahem hodnot v tabulkách.
- V dalším kroku se provede další měření pro jednu kratší základní délku, není-li toto nastavení provedeno již v předchozím měření. Opět se provede porovnání s hodnotami v tabulkách.
- Jestliže pouze první naměřené hodnoty vyhovují tabulkovým hodnotám, je daná základní délka považována za správnou. Pokud vyhovují hodnoty naměřené s kratší mezní vlnovou délkou (tj. druhé měření) je tato pokládána za správnou.

Tímto způsobem získaná mezní vlnová délka je použita pro měření požadovaných parametrů.

Pro periodický profil drsnosti se základní délka získá tímto postupem:

- U povrchu drsnosti odhadneme graficky parametr  $R_{Sm}$ . Dle tabulky č. 3 určíme pro takto odhadnutý parametr mezní vlnovou délku cut-off. V nejistých případech je možné provést měření se získanou základní délkou a následné porovnání dle tabulky č. 3. Pokud naměřená hodnota není v souladu s rozsahem parametru dle tabulky č. 3, aplikuje se pro měření žádaných parametrů větší nebo menší hodnota mezní vlnové délky.

Tab. 5. Základní délky pro měření drsnosti  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$ ,  $R_{\Delta q}$  a také křivek odpovídající parametry pro neperiodické profily [12, 14]

$R_a$ $\mu\text{m}$	Základní délka drsnosti $l_r$ mm	Vyhodnocovaná délka drsnosti $l_n$ mm
$(0,006) < R_a \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$	0,8	4
$2 < R_a \leq 10$	2,5	12,5
$10 < R_a \leq 80$	8	40

Tab. 6. Délka základní drsnosti pro měření  $R_z$ ,  $R_v$ ,  $R_p$ ,  $R_c$  a  $R_t$  neperiodických profilů [12, 14]

$R_z^{1)}$ $R_{z1\text{max.}}^{2)}$ $\mu\text{m}$	Základní délka drsnosti $l_r$ mm	Vyhodnocovaná délka drsnosti $l_n$ mm
$(0,025) < R_z, R_{z1\text{max.}} \leq 0,1$	0,08	0,4
$0,1 < R_z, R_{z1\text{max.}} \leq 0,5$	0,25	1,25
$0,5 < R_z, R_{z1\text{max.}} \leq 10$	0,8	4
$10 < R_z, R_{z1\text{max.}} \leq 50$	2,5	12,5
$50 < R_z, R_{z1\text{max.}} \leq 200$	8	40

<sup>1)</sup>  $R_z$  je použito při měření  $R_z$ ,  $R_v$ ,  $R_p$ ,  $R_c$ , a  $R_t$   
<sup>2)</sup>  $R_{z1\text{max.}}$  je použito jen při měření  $R_{z1\text{max.}}$ ,  $R_{v1\text{max.}}$ ,  $R_{p1\text{max.}}$  a  $R_{c1\text{max.}}$

Tab. 7. Délky základní drsnosti pro měření R-parametrů periodických profilů s  $R_{Sm}$  periodických a neperiodických profilů [12, 14]

$R_{Sm}$ $\mu\text{mm}$	Základní délka drsnosti $l_r$ mm	Vyhodnocovaná délka drsnosti $l_n$ mm
$0,013 < R_{Sm} \leq 0,04$	0,08	0,4
$0,04 < R_{Sm} \leq 0,13$	0,25	1,25
$0,13 < R_{Sm} \leq 0,4$	0,8	4
$0,4 < R_{Sm} \leq 1,3$	2,5	12,5
$1,3 < R_{Sm} \leq 4$	8	40



## 4.5 Vyhodnocení parametrů

Při kontrole struktury povrchu nesmí být uvažovány vady a jiné povrchu, tj. rýhy, póry.

Pro rozhodnutí, zda je povrch obrobku ve shodě se specifikací, či ne, je použit soubor jednotlivých hodnot parametru struktury povrchu, z nichž každý je určen na vyhodnocované délce.

Spolehlivost rozhodnutí je závislá na počtu základních délek ve vyhodnocované délce, na které byly jednotlivé hodnoty parametru struktury povrchu získány a na počtu měření povrchu. Nejvíce a nejčastěji se volí počet základních délek 5. [12, 7, 13]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 NADPIS METODA PROVEDENÍ EXPERIMENTŮ VČETNĚ ŘEZNÝCH CHARAKTERISTIK PŘI SUPERFINIŠOVÁNÍ

### 5.1 Určení parametrů drsnosti pro dokončovací metody obrábění

Superfinašování patří k nejpřesnějším mechanickým způsobům obrábění. S ohledem na dosažené parametry je jedním z nejpřesnějších dokončovacích metod v technické praxi. Superfinašování je velmi přesná metoda obrábění, priorita je přiřazena tam, kde jsou kladeny vysoké požadavky na parametry povrchových úprav, zejména drsnosti a přesnosti.

Zkoumání povrchové drsnosti po superfinašování (s parametrem  $R_a$ ) mohou být teoretické a experimentální. Větší pozornost je věnována experimentálnímu studiu vlivem parametrů superfinašování (řezných podmínek) na parametry drsnosti povrchu po procesu superfinašování (zejména prostřednictvím parametru  $R_a$ ). [17]

### 5.2 Úvod

Drsnost povrchu po superfinašování je jedním z nejdůležitějších parametrů dosažených touto metodou. Drsnost má své vlastní parametry a také nejrozšířenější, a proto je nejdůležitější, aritmetický průměr odchylek profilu konečného povrchu, i. e. parametr  $R_a$ .

Při superfinašování morfologii povrchu je parametr  $R_a$  ovlivněn zejména tlakem nástroje (superfinašování kámen) důležitým aspektem je také poměr otáček (poměr rychlosti kmitajícího Lešticího nástroje k obvodové rychlosti obrobku). Zrnitost superfinašovacího kamene zanedbáváme, protože v případě, že proces je rozdělen na hrubování a dokončování, vzorec pro výpočet všech potřebných podmínek by měl být v obou případech odvozen. Nicméně, pokud se zaměříme na průběžné superfinašování (obrobek prochází pod hrubovacími a dokončovacími kameny na jedné dráze) pouze jedna rovnice je stanovena pro výpočet  $R_a$  s ohledem na zrnitost při hrubování dokončovacími kameny. Při ostření je parametr  $R_a$  ovlivněn zejména v době ostření  $t_r$  a tlakem na nástroj na ps obrobku. [17]

### 5.3 Zdrojové rovnice pro stanovení parametru Ra.

Ve skutečnosti doba potřebná na snížení drsnosti je negativní první derivace parametru Ra v závislosti na době superfinišování. Tentokrát pokles parametru drsnosti Ra může být úměrná drsnosti, která je stanovena parametrem Ra. [17]

$$-\frac{dRa}{dt_r} = a \cdot Ra \quad (2.1)$$

Řešení diferenciální rovnice je:

$$\begin{aligned} \frac{dRa}{Ra} &= -a \cdot dt_r \\ \ln Ra &= -a \cdot t_r + C \\ Ra &= e^{-a \cdot t_r + C} \\ Ra &= e^C \cdot e^{-a \cdot t_r} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Kde:

a... je konstanta úměrnosti

C... je integrační konstanta

$C_{Ra}$  ( $C_{Ra}=e^C$ )... je konstanta která má hodnotu počáteční drsnosti při superfinišování (při  $R = 0$ )

Rovnice (2.2) se nahrazuje:

$$Ra = Ra_p \cdot e^{-a \cdot t_r} \quad (2.3)$$

Pokud budeme uvažovat, že doba superfinišování je úměrná poklesu parametru drsnosti Ra, dostaneme základní rovnici.

$$-\frac{dRa}{dt_r} = (k_1 + k_2 t_r) Ra \quad (2.4)$$

po nahrazení  $k_1$ ,  $k_2$  o proporcionality konstant  $a_1$ ,  $a_2$ , dostaneme rovnici

$$Ra = C_{Ra} \cdot e^{-a_1 \cdot t_r - a_2 \cdot t_r^2} \quad (2.5)$$

kde  $C_{Ra}$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  jsou konstanty. Které pojednávají o tom, že zvýšení tlaku  $\frac{dp_s}{dt_r}$  a zvýšení rychlosti poměru  $\frac{dg}{dt_r}$  bude částečně úměrné snížení drsnosti na základě a lze je napsat do diferenciální rovnice ve tvaru

$$-\frac{dRa}{dt_r} = \left( a_1 + a_2 \frac{dp_s}{dt_r} + a_3 \frac{dg}{dt_r} \right) Ra \quad (2.6)$$

Po této úpravě se mu dostává tvaru:

$$\begin{aligned} \ln Ra &= -a_1 t_r - a_2 p_s - a_3 g + C \\ Ra &= C_{Ra} \cdot e^{-a_1 t_r - a_2 p_s - a_3 g} [\mu m] \end{aligned} \quad (2.7)$$

Příslušné diferenciální rovnice pro naše vyhledávané faktory budou mít formu:

$$-\frac{dRa}{dt_r} = \left( \frac{a_1}{t_r} + \frac{a_2}{p_s} \frac{dp_s}{dt_r} + \frac{a_3}{g} \frac{dg}{dt_r} \right) Ra, \quad (2.8)$$

Jeho následná úprava je rovnice pro drsnost Ra

$$Ra = C_{Ra} \cdot t_r^{-a_1} \cdot p_s^{-a_2} \cdot g^{-a_3} [\mu m] \quad (2.9)$$

Poslední rovnice je rozměrově nehomogenní, ale po dokončení etalonu proměnných, které jsou v centru harmonogramu experimentálního plánu je úprava následující:

$$Ra = C'_{Ra} \cdot \left( \frac{t_r}{t_{ro}} \right)^{-a_1} \cdot \left( \frac{p_s}{p_{so}} \right)^{-a_2} \cdot \left( \frac{g}{g_o} \right)^{-a_3} [\mu m] \quad (2.10)$$

Kde  $t_{ro}$ ,  $p_{so}$ , jsou hlavní proměnné. Rovnice (2.9) a (2.10) mají tu nevýhodu, že jsou nepatná pro počáteční podmínky  $t_r=0$ ,  $p_s=0$ ,  $g=0$ . Proto je pro stanovení parametru drsnosti Ra, je možno použít diferenciální rovnice

$$Ra = (Ra_p - Ra_m) e^{-at_r} + Ra_m [\mu m] \quad (2.11)$$

Kde  $Ra_p$  je vstupní hodnota Ra před superfinišovací,  $Ra_m$  je mezní hodnota Ra dosažitelná při superfinišování a je konstantní. Tato rovnice se dá rozšířit až do následujícího tvaru:

$$Ra = (Ra_p - Ra_m) e^{-a \cdot t_r - b p_s - c g} + Ra_m [\mu m] \quad (2.12)$$

kde:

b, c ... jsou konstanty.

## 5.4 Metodika původního plánu experimentu pro stanovení konstant pro různé základní rovnice pro Ra.

Metodická problematika o harmonogramu lineárního modelu má vzorec:

$$v = a_0 + a_1 u_1 + a_2 u_2 + a_3 u_3 \quad (3.1)$$

Kvadratická závislost lze změnit na lineárních modelech transformace. Pro transformaci lineárního modelu na požadované vzorce, opět pomocí transformačních rovnic. Tyto rovnice dosadíme do lineárního modelu (13).

### Transformace č. 1

$$v = \ln y, u_1 = z_1, u_2 = z_2, u_3 = z_3 \quad (3.2)$$

je možné rozložit na exponenciální rovnice

$$\begin{aligned} \ln y &= a_0 + a_1 z_1 + a_2 z_2 + a_3 z_3 \\ y &= e^{a_0 + a_1 z_1 + a_2 z_2 + a_3 z_3} \\ y &= C e^{a_1 z_1 + a_2 z_2 + a_3 z_3} \end{aligned} \quad (3.3)$$

### Transformace č. 2

$$v = \ln y, u_1 = \ln z_1, u_2 = \ln z_2, u_3 = \ln z_3 \quad (3.4)$$

Jedna z možností jak dostat translační rovnici

$$y = C \cdot z_1^{a_1} \cdot z_2^{a_2} \cdot z_3^{a_3} \quad (3.5)$$

### Transformace č. 3

$$v = \frac{1}{y}, u_1 = z_1, u_2 = z_2, u_3 = z_3 \quad (3.6)$$

Po dosazení

$$y = \frac{1}{a_0 + a_1 z_1 + a_2 z_2 + a_3 z_3} \quad (3.7)$$

### Transformace č. 4

$$v = \frac{1}{y}, u_1 = \frac{1}{z_1}, u_2 = \frac{1}{z_2}, u_3 = \frac{1}{z_3} \quad (3.8)$$

Po dosazení:

$$y = \frac{z_1 \cdot z_2 \cdot z_3}{a_0 z_1 z_2 z_3 + a_1 z_2 z_3 + a_2 z_1 z_3 + a_3 z_1 z_2} \quad (3.9)$$

### Transformace č. 5

$$v = y, u_1 = \ln z_1, u_2 = \ln z_2, u_3 = \ln z_3 \quad (3.10)$$

Po dosazení logaritmických veličin:

$$y = a_o + a_1 \ln z_1 + a_2 \ln z_2 + a_3 \ln z_3 \quad (3.11)$$

### Transformace č. 6

$$v = y, u_1 = \frac{1}{z_1}, u_2 = \frac{1}{z_2}, u_3 = \frac{1}{z_3} \quad (3.12)$$

Po dosazení:

$$y = a_o + a_1 z_1 + a_2 z_2 + a_3 z_3 \quad (3.13)$$

### Transformace č. 7

$$v = \frac{1}{y}, u_1 = \ln z_1, u_2 = \ln z_2, u_3 = \ln z_3 \quad (3.14)$$

Po dosazení:

$$y = \frac{1}{a_o + a_1 \ln z_1 + a_2 \ln z_2 + a_3 \ln z_3} \quad (3.15)$$

### Transformace č. 8

$$v = \ln y, u_1 = \frac{1}{z_1}, u_2 = \frac{1}{z_2}, u_3 = \frac{1}{z_3} \quad (3.16)$$

Po dosazení:

$$y = e^{a_o + \frac{a_1}{z_1} + \frac{a_2}{z_2} + \frac{a_3}{z_3}} \quad (3.17)$$

**Transformace č. 9** v případě, že úhel otáčení obrobku je ekvivalentní

$$v = y, u_1 = \operatorname{tg} z_1, u_2 = \operatorname{tg} z_2, u_3 = \operatorname{tg} z_3 \quad (3.18)$$

Po dosazení:

$$y = a_o + a_1 \operatorname{tg} z_1 + a_2 \operatorname{tg} z_2 + a_3 \operatorname{tg} z_3 \quad (3.19)$$

## Transformace č. 10

$$v = tgy, u_1 = z_1, u_2 = z_2, u_3 = z_3 \quad (3.20)$$

Po dosazení:

$$y = \arctg(a_0 + a_1 z_1 + a_2 z_2 + a_3 z_3) \quad (3.21)$$

Hledaná velikost:  $y = Ra$

Mezi faktory:  $z_1 = t_r, z_2 = p_s, z_3 = g$

Pro pomoc s výpočty v plánovaném experimentu jsou kódované faktory použity v základních rovnicích.

$$x_1 = \frac{2(z_1 - z_{1max})}{z_{1max} - z_{1min}} + 1, \quad x_2 = \frac{2(z_2 - z_{2max})}{z_{2max} - z_{2min}} + 1, \quad x_3 = \frac{2(z_3 - z_{3max})}{z_{3max} - z_{3min}} + 1 \quad (3.22)$$

Racionalizovaná základní rovnice obsahují kromě kódovaných faktorů i hodnoty etalonu od centra experimentálního plánu

$$x_1 = \frac{2\left(\frac{z_1}{z_{10}} - \frac{z_{1max}}{z_{10}}\right)}{\frac{z_{1max}}{z_{10}} - \frac{z_{1min}}{z_{10}}} + 1, \quad x_2 = \frac{2\left(\frac{z_2}{z_{20}} - \frac{z_{2max}}{z_{20}}\right)}{\frac{z_{2max}}{z_{20}} - \frac{z_{2min}}{z_{20}}} + 1, \quad x_3 = \frac{2\left(\frac{z_3}{z_{30}} - \frac{z_{3max}}{z_{30}}\right)}{\frac{z_{3max}}{z_{30}} - \frac{z_{3min}}{z_{30}}} + 1 \quad (3.23)$$

Pro získání dalších kódovaných faktorů použijeme transformační rovnice. Příklad získání kódovaných faktorů pomocí transformačních rovnic:

$$x_1 = \frac{2(\ln z_1 - \ln z_{1max})}{\ln z_{1max} - \ln z_{1min}} + 1, \quad x_2 = \frac{2(\ln z_2 - \ln z_{2max})}{\ln z_{2max} - \ln z_{2min}} + 1, \quad x_3 = \frac{2(\ln z_3 - \ln z_{3max})}{\ln z_{3max} - \ln z_{3min}} + 1 \quad (3.24)$$

Pokud chceme rozměrové homogenní rovnice, musíme racionalizovat kódované faktory pomocí rovnice.

Pro výsledné rovnice Ra parametru je třeba použít regresní rovnici ve tvaru:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 [-] \quad (3.25)$$



kde:

$b_0, b_1, b_2, b_3$  jsou regresní koeficienty,  $x_1, x_2, x_3$  jsou faktory etalonu.

Po dosažení kódovaných faktorů lze sestavit příslušné tabulky s pomocí plánování experimentů. Na základě tří faktorů jsme se rozhodli tří-faktorový experiment s počtem pozorování  $n = 8$ . Pro každý faktor volíme nižší úroveň  $z_{1min}, z_{2min}, z_{3min}$ , v horním patře  $z_{1max}, z_{2max}, z_{3max}$  a pro racionalizované rovnice nebo pro testování je střední úroveň  $z_{10}, z_{20}, z_{30}$ .. Tabulky mají tvar: [17]

Tab. 8. Trojfaktorový experiment – první část [17]

Number of observations $i$	$z_1$ resp. $\frac{z_1}{z_{10}}$	$\frac{1}{z_1}$	$lnz_1$	$tgz_1$	$z_2$ resp. $\frac{z_2}{z_{20}}$	$\frac{1}{z_2}$	$lnz_2$	$tgz_2$	$z_3$ resp. $\frac{z_3}{z_{30}}$	$\frac{1}{z_3}$	$lnz_3$	$tgz_3$
1-8												
$\sum N = 8$												

Tab. 9. Trojfaktorový experiment – druhá část [17]

$i$	$y$	$\frac{1}{y}$	$lny$	$tgy$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1; y_i$	$x_2; y_i$	$x_3; y_i$
1-8											
$\sum N = 8$											

Tab. 10. Trojfaktorový experiment – třetí část [17]

$i$	$x_1; \frac{1}{y_i}$	$x_2; \frac{1}{y_i}$	$x_3; \frac{1}{y_i}$	$x_1; lny_i$	$x_2; lny_i$	$x_3; lny_i$	$x_1; tgy_i$	$x_2; tgy_i$	$x_3; tgy_i$
1-8									
$\sum N = 8$									

Po naplnění tabulky 1, počítáme sloupcové součty, požadovaných sloupců a vypočítáme regresní koeficienty podle vzorce

$$b_i = \frac{1}{N} \sum x_i; y_i [-] \tag{3.26}$$

Do regresní rovnice (3.25) dosadíme regresní koeficienty  $b_0, b_1, b_2, b_3$  a kódované faktory  $x_1, x_2, x_3$  podle rovnice (3.22). Po úpravě dostaneme požadovanou rovnici.

## 5.5 Závěr výpočtu

Vyhodnocení experimentálních dat, je často velmi obtížné. Při hledání matematických vzorců v závislosti na hodnotu vstupních faktorů používaných pro lineární model. Často není možné použít přímo. Z tohoto důvodu je nutná, nelineární transformace lineárního modelu. [17]

Tahle část práce analyzuje možné tvary rovnic pro střední aritmetické odchyly profilu drsnosti povrchu v superfinišovací řádu nových vztahů pro parametr drsnosti povrchu Ra. Ty byly vytvořeny za použití různých transformací. Lze jej použít pro experimentální stanovení matematických vzorců pro výpočet parametru drsnosti Ra, za použití teoretického pozadí a způsob plánování experimentu. [17]

Metodika byla navržena pro superfinišovací technologie. Nicméně je snadno použitelná pro určení matematický vztahů parametrů Ra vstupních faktorů pro další technologii obrábění. Je také možné použít metody pro určení matematickou závislost řezné síly, řezné teploty a dalších parametrů vstupních faktorů v různých obrábění. [17]

## 6 ZPRACOVÁNÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ ANALYTICKY A GRAFICKY

V tabulkách jsou uvedeny hodnoty drsnosti povrchu v závislosti na uvedené časy a četnost 12 měření.

Je nutné vypočítat pro každý soubor:

- výpočet střední hodnoty  $R_a$
- pomocí regresní analýzy kvantifikovat závislost  $R_a = f(\text{času})$  s předpokládanou závislostí  $R_a = a \cdot t^b$  (výpočet „a“ a „b“)
- výběrový rozptyl  $s^2$
- výběrovou směrodatnou odchýlku  $s$
- s pravděpodobností 99,73% vypočítat pro každý soubor maximální a minimální hodnotu  $R_{a \max}$  a  $R_{a \min}$
- jaká je pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude u jednotlivých časů v rozmezí zadaných hodnot pro jednotlivé časy

## 6.1 Naměřené hodnoty Ra na čase

### Čas 5 s

n	Ra [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,2400
4	0,2300
5	0,2200
2	0,2100

(0,2-0,235)

### Čas 20 s

n	Ra [ $\mu\text{m}$ ]
2	0,0100
5	0,1200
4	0,1100
1	0,0800

(0,085-0,115)

### Čas 40 s

n	Ra [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,0450
7	0,0700
4	0,0600
1	0,0400

(0,045-0,065)

### Čas 60 s

n	Ra [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,0200
5	0,0600
6	0,0500
2	0,0300

(0,025-0,055)

### Čas 10 s

n	Ra [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,1350
6	0,1550
4	0,1450
1	0,1300

(0,135-0,15)

### Čas 30 s

n	Ra [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,0750
6	0,0800
3	0,0700
2	0,0600

(0,065-0,075)

### Čas 50 s

n	Ra [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,0600
4	0,0650
5	0,0500
2	0,0400

(0,045-0,06)

Obr. 44. Naměřené hodnoty Ra na čase

## 6.2 Výpočet zadaných úloh dle naměřených hodnot v tabulkách

Vážený průměr:

$$\bar{x}_M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i f_i$$

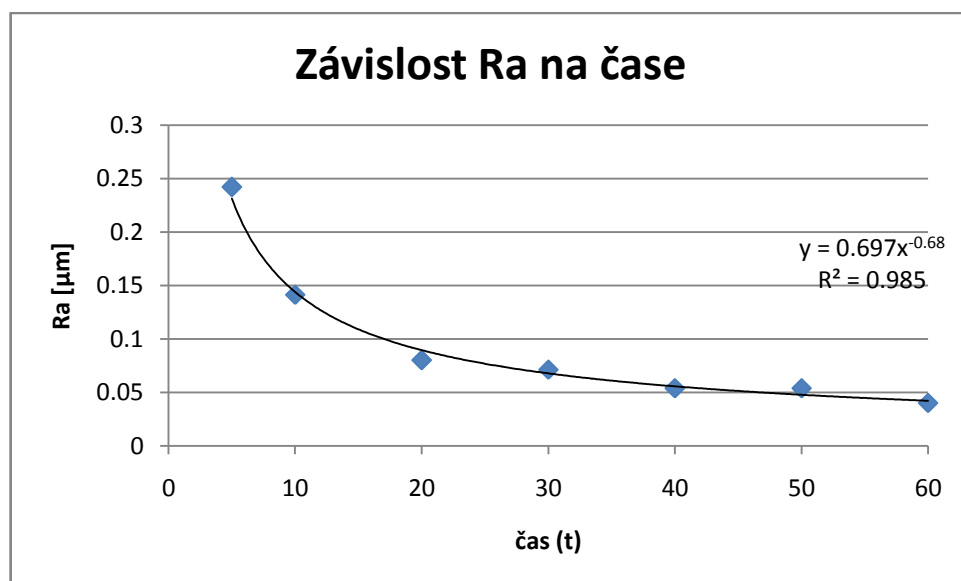
Rozptyl:

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Směrodatná odchylka:  $s = \sqrt{s^2}$

Tab. 11. hodnoty závislosti Ra na čase

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	t [s]
0,242	5
0,14125	10
0,08	20
0,07125	30
0,05375	40
0,05375	50
0,04	60



Graf 1. Závislost hodnoty Ra na čase

Po dosazení naměřených hodnot je výsledek konstant:

$$x_k = -0,686$$

$$k = 0,6974$$

**Čas  $t = 5$  s**

**rozmezí hodnot drsnosti povrchu (0,2-0,235)**

Tab. 12. Naměřené hodnoty Ra v čase 5 s.

n	Ra [μm]
1	0,2400
4	0,2300
5	0,2200
2	0,2100

Hledaná závislost:

$$Ra = k \cdot t^{x_k} = 0,6974 \cdot 5^{-0,686}$$

$$Ra = 0,23 \text{ [μm]}$$

Vážený Průměr:

$$\bar{x} = Ra$$

$$\text{Průměrná hodnota } Ra = 0,225 \text{ [μm]}$$

Rozptyl:

$$s^2 = \frac{1}{12} \Sigma (0,24 - 0,23)^2 + 4 * (0,23 - 0,23)^2 + 5 * (0,22 - 0,23)^2 + 2 * (0,21 - 0,23)^2$$

$$s^2 = 0,00016667$$

Směrodatná odchylka:

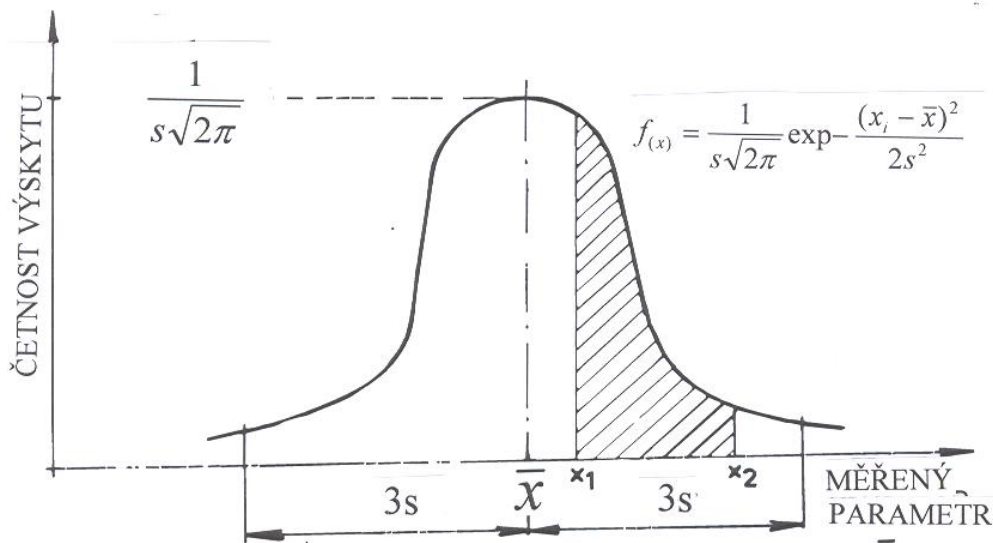
$$s = \sqrt{0,00016667} = 0,013$$

$$R_{\max} = \bar{x} + 3s = 0,23 + 3 * 0,013 = 0,269$$

$$R_{\min} = \bar{x} - 3s = 0,23 - 3 * 0,013 = 0,191$$

**Normální rozdělení** je charakterizováno křivkou zvonovitého charakteru. Hustota pravděpodobnosti normálně rozdělených náhodných veličin nabývajících hodnot  $x$  v intervalu  $<-\infty;+\infty>$  a  $s > 0$  je vyjádřena vztahem:

$$\Phi_{(x_1 \leq x \leq x_2)} = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} \exp - \frac{(x - \bar{x})^2}{2s^2} dx$$



Obr. 45. Grafické znázornění normálního rozdělení

Zavedením substituce  $\frac{x - \bar{x}}{s} = z$ , převedeme vztah na **normované normální rozdělení** se střední hodnotou 0 a rozptylem 1.

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left(-\frac{z^2}{2}\right)} \quad \text{resp.}$$

$$\phi_{(z)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^z e^{\left(-\frac{z^2}{2}\right)} dz$$

a jako takové se s použitím tabulky používá pro praktický výpočet.

$$z_1 = \frac{x_1 - \bar{x}}{s} = \frac{0,2 - 0,23}{0,013} = -2,3$$

$$z_2 = \frac{x_2 - \bar{x}}{s} = \frac{0,235 - 0,23}{0,013} = 0,38$$

Pro  $z_1$  a  $z_2$  odečteno z tabulek:

$$\Phi_{(z_1)} = -\Phi_{(z_2)} = -0,4893$$

$$\Phi_{(z_2)} = 0,1480$$

$$P = 0,1480 - (-0,4893) = 0,6373 = 63,73\%$$

Pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude u jednotlivých časů v rozmezí zadaných hodnot je 63,73%.

**Čas  $t=10$  s**

**rozmezí hodnot drsnosti povrchu (0,135-0,15)**

Tab. 13. Naměřené hodnoty Ra v čase 10 s.

n	Ra [μm]
1	0,1350
6	0,1550
4	0,1450
1	0,1300

Hledaná závislost:

$$Ra = k \cdot t^{xk} = 0,6974 \cdot 10^{-0,686}$$

$$Ra = 0,144 \text{ [μm]}$$

Vážený Průměr:

$$\bar{x} = Ra$$



Průměrná hodnota  $R_a=0,14125[\mu\text{m}]$

Rozptyl:

$$s^2 = \frac{1}{12} \Sigma (0,1350 - 0,144)^2 + 6 * (0,1550 - 0,144)^2 + 4 * (0,1450 - 0,144)^2 + 1 * (0,13 - 0,144)^2$$

$$s^2 = 0,00008392$$

Směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{0,00008392} = 0,00916$$

$$R_{\max} = \bar{x} + 3s = 0,144 + 3 * 0,00916 = 0,1715$$

$$R_{\min} = \bar{x} - 3s = 0,144 - 3 * 0,00916 = 0,11652$$

$$z_1 = \frac{x_1 - \bar{x}}{s} = \frac{0,135 - 0,144}{0,00916} = -0,98$$

$$z_2 = \frac{x_2 - \bar{x}}{s} = \frac{0,15 - 0,144}{0,00916} = 0,66$$

Pro  $z_1$  a  $z_2$  odečteno z tabulek:

$$\Phi_{(z_1)} = -\Phi_{(z_2)} = -0,3365$$

$$\Phi_{(z_2)} = 0,2454$$

$$P = 0,2454 - (-0,3365) = 0,5819 = 58,19\%$$

Pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude u jednotlivých časů v rozmezí zadaných hodnot je 58,19%.

Čas  $t=20$  s

rozmezí hodnot drsnosti povrchu (0,085-0,115)

Tab. 14. Naměřené hodnoty Ra v čase 20 s.

n	Ra [μm]
2	0,01
5	0,1200
4	0,1100
1	0,08

Hledaná závislost:

$$Ra = k \cdot t^{x_k} = 0,6974 \cdot 20^{-0,686}$$

$$Ra = 0,0893 \text{ [μm]}$$

Vážený průměr:

$$\bar{x} = Ra$$

Průměrná hodnota  $Ra = 0,08 \text{ [μm]}$

Rozptyl:

$$s^2 = \frac{1}{12} \Sigma 2 * (0,01 - 0,0893)^2 + 5 * (0,12 - 0,0893)^2 + 4 * (0,11 - 0,0893)^2 + 1 * (0,08 - 0,0893)^2$$

$$s^2 = 0,0015908$$

Směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{0,0015908} = 0,03988$$

$$R_{\max} = \bar{x} + 3s = 0,0893 + 3 * 0,03988 = 0,2089$$

$$R_{\min} = \bar{x} - 3s = 0,0893 - 3 * 0,03988 = 0,005$$

$$z_1 = \frac{x_1 - \bar{x}}{s} = \frac{0,085 - 0,0893}{0,03988} = -0,11$$

$$z_2 = \frac{x_2 - \bar{x}}{s} = \frac{0,115 - 0,0893}{0,03988} = 0,64$$

Pro  $z_1$  a  $z_2$  odečteno z tabulek:

$$\Phi_{(z_1)} = -\Phi_{(z_2)} = -0,0438$$

$$\Phi_{(z_2)} = 0,2389$$

$$P = 0,2389 - (-0,0438) = 0,2827 = 28,27\%$$

Pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude u jednotlivých časů v rozmezí zadaných hodnot je 28,27%.

**Čas  $t=30$  s**

**rozmezí hodnot drsnosti povrchu (0,065-0,075)**

Tab. 15. Naměřené hodnoty  $Ra$  v čase 30 s.

n	$Ra$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,0750
6	0,080
3	0,0700
2	0,0600

Hledaná závislost:

$$Ra = k \cdot t^{\text{sk}} = 0,6974 \cdot 30^{-0,686}$$

$$Ra = 0,068 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Vážený průměr:

$$\bar{x} = Ra$$

$$\text{Průměrná hodnota } Ra = 0,07125 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Rozptyl:

$$s^2 = \frac{1}{12} \Sigma (0,075 - 0,068)^2 + 6 * (0,08 - 0,068)^2 + 3 * (0,07 - 0,068)^2 + 2 * (0,06 - 0,068)^2$$

$$s^2 = 0,00008775$$

Směrodatná odchylka

$$s = \sqrt{0,00008775} = 0,009367$$

$$R_{\max} = \bar{x} + 3s = 0,068 + 3 \cdot 0,009367 = 0,096$$

$$R_{\min} = \bar{x} - 3s = 0,068 - 3 \cdot 0,009367 = 0,026$$

$$z_1 = \frac{x_1 - \bar{x}}{s} = \frac{0,065 - 0,068}{0,009367} = -0,32$$

$$z_2 = \frac{x_2 - \bar{x}}{s} = \frac{0,075 - 0,068}{0,009367} = 0,74$$

Pro  $z_1$  a  $z_2$  odečteno z tabulek:

$$\Phi_{(z_1)} = -\Phi_{(z_2)} = -0,1255$$

$$\Phi_{(z_2)} = 0,2703$$

$$P = 0,2703 - (-0,1255) = 0,3958 = 39,58\%$$

Pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude u jednotlivých časů v rozmezí zadaných hodnot je 39,58%.

Čas  $t=40$  s

rozmezí hodnot drsnosti povrchu (0,045-0,065)

Tab. 16. Naměřené hodnoty  $R_a$  v čase 40 s.

n	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,045
7	0,07
4	0,06
1	0,04

hledaná závislost:

$$R_a = k \cdot t^{x_k} = 0,6974 \cdot 40^{-0,686}$$

$$R_a = 0,056 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Vážená průměr:

$$\bar{x} = R_a$$

$$\text{Průměrná hodnota } R_a = 0,05375 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Rozptyl:

$$s^2 = \frac{1}{12} \Sigma (0,045 - 0,056)^2 + 7 * (0,07 - 0,056)^2 + 4 * (0,06 - 0,056)^2 + 1 * (0,04 - 0,056)^2$$

$$s^2 = 0,000151$$

Směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{0,000151} = 0,012$$

$$R_{\max} = \bar{x} + 3s = 0,056 + 3 * 0,012 = 0,092$$

$$R_{\min} = \bar{x} - 3s = 0,056 - 3 * 0,012 = 0,02$$

$$z_1 = \frac{x_1 - \bar{x}}{s} = \frac{0,045 - 0,056}{0,012} = -0,92$$

$$z_2 = \frac{x_2 - \bar{x}}{s} = \frac{0,065 - 0,056}{0,012} = 0,75$$

Pro  $z_1$  a  $z_2$  odečteno z tabulek:

$$\Phi_{(z_1)} = -\Phi_{(z_2)} = -0,3212$$

$$\Phi_{(z_2)} = 0,2734$$

$$P = 0,2734 - (-0,3212) = 0,5946 = 59,46\%$$

Pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude u jednotlivých časů v rozmezí zadaných hodnot je 59,46%.

**Čas  $t=50$  s**

**rozmezí hodnot drsnosti povrchu (0,045-0,06)**

Tab. 17. Naměřené hodnoty  $Ra$  v čase 50 s.

n	$Ra$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,0600
4	0,0650
5	0,0500
2	0,0400

hledaná závislost:

$$Ra = k \cdot t^{x_k} = 0,6974 \cdot 50^{-0,686}$$

$$Ra = 0,048 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Vážený průměr:

$$\bar{x} = Ra$$

$$\text{Průměrná hodnota } Ra = 0,05375 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Rozptyl:

$$s^2 = \frac{1}{12} \Sigma (0,06 - 0,048)^2 + 4 * (0,065 - 0,048)^2 + 5 * (0,05 - 0,048)^2 + 2 * (0,04 - 0,048)^2$$

$$s^2=0,000121$$

Směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{0,000121} = 0,011$$

$$R_{\max} = \bar{x} + 3s = 0,048 + 3 \cdot 0,011 = 0,081$$

$$R_{\min} = \bar{x} - 3s = 0,048 - 3 \cdot 0,011 = 0,015$$

$$z_1 = \frac{x_1 - \bar{x}}{s} = \frac{0,045 - 0,048}{0,011} = -0,28$$

$$z_2 = \frac{x_2 - \bar{x}}{s} = \frac{0,06 - 0,048}{0,011} = 1,1$$

Pro  $z_1$  a  $z_2$  odečteno z tabulek:

$$\Phi_{(z_1)} = -\Phi_{(z_2)} = -0,1103$$

$$\Phi_{(z_2)} = 0,3643$$

$$P = 0,3643 - (-0,1103) = 0,4746 = 47,46\%$$

Pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude u jednotlivých časů v rozmezí zadaných hodnot je 47,46%.

Čas  $t=60$  s

rozmezí hodnot drsnosti povrchu (0,025-0,055)

Tab. 18. Naměřené hodnoty Ra v čase 60 s.

n	Ra [μm]
1	0,02
5	0,06
6	0,05
2	0,03

hledaná závislost:

$$Ra = k \cdot t^{x_k} = 0,6974 \cdot 60^{-0,686}$$

$$Ra = 0,042 \text{ [μm]}$$

Vážený průměr:

$$\bar{x} = Ra$$

Průměrná hodnota Ra=0,04[μm]

Rozptyl:

$$s^2 = \frac{1}{12} \Sigma (0,02 - 0,042)^2 + 5 * (0,06 - 0,042)^2 + 6 * (0,05 - 0,042)^2 + 2 * (0,03 - 0,042)^2$$

$$s^2 = 0,0002313$$

Směrodatná odchylka

$$s = \sqrt{0,0002313} = 0,015$$

$$R_{\max} = \bar{x} + 3s = 0,042 + 3 * 0,015 = 0,087$$

$$R_{\min} = \bar{x} - 3s = 0,042 - 3 * 0,015 = 0,01$$

$$z_1 = \frac{x_1 - \bar{x}}{s} = \frac{0,025 - 0,042}{0,015} = -1,13$$



$$z_2 = \frac{x_2 - \bar{x}}{s} = \frac{0,055 - 0,042}{0,015} = 0,87$$

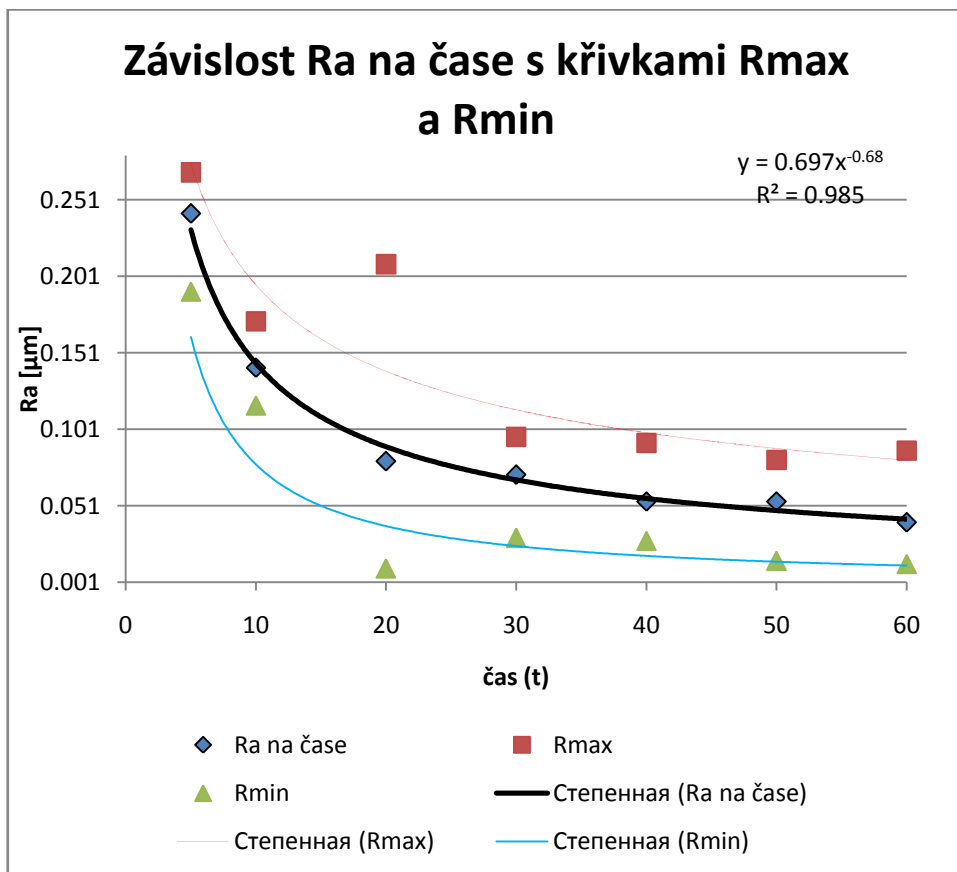
Pro  $z_1$  a  $z_2$  odečteno z tabulek:

$$\Phi_{(z_1)} = -\Phi_{(z_2)} = -0,3708$$

$$\Phi_{(z_2)} = 0,3078$$

$$P = 0,3078 - (-0,3708) = 0,6786 = 67,86\%$$

Pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude u jednotlivých časů v rozmezí zadaných hodnot je 67,86%.



Graf 2. Závislost hodnoty Ra na čase s křivkami Rmax a Rmin

## 7 CELKOVÉ ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A DOPORUČENÍ PRO PRAXI

Pro superfinišování a následné měření drsnosti povrchu byl aplikován ve firmě BEST Kunštát na Moravě materiál zvaný ložisková ocel ČSN 14 109.4. V intervalech 5, 10, 20, 30, 40, 50 a 60 sekund se měřila drsnost Ra s výsledky uvedených v tabulkách.

Tab. 19. Vypočtené hodnoty v časech 5, 10, 20 sekund

Čas[s]	5	10	20
Vážený průměr	0,23	0,144	0,0893
Rozptyl	0,00016667	0,00008392	0,0015908
Směrodatná odchylka	0,013	0,00916	0,03988
Rmax	0,269	0,1715	0,2089
Rmin	0,191	0,11652	0,005
z1	-2,3	-0,98	-0,11
z2	0,38	0,66	0,64
Střední hodnota Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,225	0,14125	0,08
Ra = f(času)	0,23	0,144	0,0893
Pravděpodobnost [%]	63,73	58,19	28,27

Tab. 20. Vypočtené hodnoty v časech 30, 40, 50, 60 sekund

Čas[s]	30	40	50	60
Vážený průměr	0,068	0,056	0,048	0,042
Rozptyl	0,00008775	0,000151	0,000121	0,0002313
Směrodatná odchylka	0,009367	0,012	0,011	0,015
Rmax	0,096	0,092	0,081	0,087
Rmin	0,026	0,02	0,015	0,01
z1	-0,32	-0,92	-0,28	-1,13
z2	0,74	0,75	1,1	0,87
Střední hodnota Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,07125	0,05375	0,05375	0,04
Ra = f(času)	0,068	0,056	0,048	0,042
Pravděpodobnost [%]	39,58	59,46	47,46	67,86

S kvalitou a výslednou drsností superfinišovaných ploch by mohla v praxi nalézt mnoho aplikací například při výrobě třecích ploch běžných ložisek, přesouvačů, lamel, kuželových upínacích ploch nástrojů, ale i nejpřesnějších funkčních prvků jako přesné plochy vřeten, středících ploch hlavních vřeten, kluzné plochy hlavních ložisek, pinol a pístů. Aplikace je vhodná i pro doteky přesných měřidel.

## ZÁVĚR

Na základě naměřených hodnot  $R_a = a \cdot t^b$  byla vypočítána střední hodnotu  $R_a$ , pomocí regresní analýzy kvantifikoval závislost  $R_a = f(\text{času})$  s předpokládanou závislostí, výběrový rozptyl, směrodatnou odchylku, s pravděpodobností 99,73% vypočítal pro každý soubor maximální a minimální hodnotu  $R_{a \max}$  a  $R_{a \min}$  a pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude u jednotlivých časů v rozmezí zadaných hodnot. Při aplikaci materiálu ložisková ocel ČSN 14 109.4.

Při čase 5 sekund:

- Je střední hodnota  $R_a = 0,225 \mu\text{m}$ , pomocí regresní analýzy a závislosti  $R_a = f(\text{času})$  je  $R_a = 0,23 \mu\text{m}$ , výběrový rozptyl  $s^2 = 0,00016667$ , směrodatná odchylka  $s = 0,013$ ,  $R_{\max} = 0,269$ ,  $R_{\min} = 0,191$  a Pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude u jednotlivých časů v rozmezí zadaných hodnot je 63,73%

Při čase 10 sekund:

- Je střední hodnota  $R_a = 0,14125 \mu\text{m}$ , pomocí regresní analýzy a závislosti  $R_a = f(\text{času})$  je  $R_a = 0,144 \mu\text{m}$ , výběrový rozptyl  $s^2 = 0,00008392$ , směrodatná odchylka  $s = 0,00916$ ,  $R_{\max} = 0,1715$ ,  $R_{\min} = 0,11652$  a Pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude u jednotlivých časů v rozmezí zadaných hodnot je 58,19%

Při čase 20 sekund:

- Je střední hodnota  $R_a = 0,08 \mu\text{m}$ , pomocí regresní analýzy a závislosti  $R_a = f(\text{času})$  je  $R_a = 0,0893 \mu\text{m}$ , výběrový rozptyl  $s^2 = 0,0015908$ , směrodatná odchylka  $s = 0,03988$ ,  $R_{\max} = 0,2089$ ,  $R_{\min} = 0,005$  a Pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude u jednotlivých časů v rozmezí zadaných hodnot je 28,27%

Při čase 30 sekund:

- Je střední hodnota  $R_a = 0,07125 \mu\text{m}$ , pomocí regresní analýzy a závislosti  $R_a = f(\text{času})$  je  $R_a = 0,068 \mu\text{m}$ , výběrový rozptyl  $s^2 = 0,00008775$ , směrodatná odchylka  $s = 0,009367$ ,  $R_{\max} = 0,096$ ,  $R_{\min} = 0,026$  a Pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude u jednotlivých časů v rozmezí zadaných hodnot je 39,58%

Při čase 40 sekund:

- Je střední hodnota  $R_a = 0,05375 \mu\text{m}$ , pomocí regresní analýzy a závislosti  $R_a = f(\text{času})$  je  $R_a = 0,056 \mu\text{m}$ , výběrový rozptyl  $s^2 = 0,000151$ , směrodatná odchylka  $s = 0,012$ ,  $R_{\text{max}} = 0,092$ ,  $R_{\text{min}} = 0,02$  a Pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude u jednotlivých časů v rozmezí zadaných hodnot je 59,46%

Při čase 50 sekund:

- Je střední hodnota  $R_a = 0,05375 \mu\text{m}$ , pomocí regresní analýzy a závislosti  $R_a = f(\text{času})$  je  $R_a = 0,048 \mu\text{m}$ , výběrový rozptyl  $s^2 = 0,000121$ , směrodatná odchylka  $s = 0,011$ ,  $R_{\text{max}} = 0,081$ ,  $R_{\text{min}} = 0,015$  a Pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude u jednotlivých časů v rozmezí zadaných hodnot je 47,46%

Při čase 60 sekund:

- Je střední hodnota  $R_a = 0,04 [\mu\text{m}]$ , pomocí regresní analýzy a závislosti  $R_a = f(\text{času})$  je  $R_a = 0,042[\mu\text{m}]$ , výběrový rozptyl  $s^2 = 0,0002313$ , směrodatná odchylka  $s = 0,015$ ,  $R_{\text{max}} = 0,087$ ,  $R_{\text{min}} = 0,01$  a Pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude u jednotlivých časů v rozmezí zadaných hodnot je 67,86%

Na přiloženém grafu č. 1 je názorně vidět, že křivka hodnoty  $R_a$  s přibývajícím časem klesá. Což lze také vyčíst z přiděleného výpočtu v praktické části.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] KOČMAN, K. *Technologické procesy obrábění*. 1.vyd.. Brno, CERM s.r.o., 2011, 330s., ISBN 978- 80-7204-722-2
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. 1. vydání. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. 251s. [online]. [cit. 2011 -10 - 05]. Dostupné z WWW: <<http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>>.
- [3] Joseph, R.Davis.; a kol. *metals handbook ninth edition volume 16 machining*, 1.vyd. 1989, USA, 943 s., ISBN 0-87170-007-7
- [4] KOČMAN, K.; Prokop J. *Speciální technologie obrábění řešené příklady*.1. vyd.. Brno,CERM s.r.o., 2004, 227 s., ISBN 80-2142-562-8
- [5] HUMÁR, A.; Technologie I, *Technologie obrábění – 3. část, Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program*, vyd.. Brno, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2005,57 s.
- [6] KOČMAN, K. *Speciální technologie. Obrábění*. 3. přepracované a doplněné vyd.. Brno, CERM s.r.o., 2004, 227 s., ISBN 80-214-2562-8.
- [7] ČSN EN ISO 4287:1999. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. ČSNI, Praha, 1999
- [8] ČSN EN ISO 4288 *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) ? Struktura povrchu: Profilová metoda, Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. ČSNI, Praha, 1999

- [9] KOCMAN, K. *Analysis of development grinding Wheel on the basic of microcrystallino corundum. In manufacturing technology, journal for science and production*, December 2010, vol. x, p 2-10. ISSN 1213-2481
- [10] JANÁČ, A.; BÁTORA, B.; BARÁNEK, I.; LÍPA, Z. *Technologie obrábění*. 1. vyd. Bratislava, 2004, 224 s., ISBN 80-227-2031-3.
- [11] TICHÁ Š. *Strojírenská metrologie část 1*, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 2004, 112 s., ISBN 80-248-1209-6
- [12] NEZDAŘILÍKOVÁ M. *Metrologická konfirmace měřidla*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Bakalářská práce, 2011. Vedoucí bakalářské práce Petr Koška.
- [13] Návod k obsluze, Drsnoměr SJ-210, Mitutoyo
- [14] Měření drsnosti povrchu, reklamní materiál firmy Mitutoyo Česko, s.r.o.
- [15] KOCMAN, K. a kol.: *Aktuální příručka pro technologický úsek*. Verlag Dashofer, 16. Aktualizované vydání, Praha 2001, ISBN 80-902247-2-5
- [16] AB SANDVIK COROMANT-SANDVIK CZ, s.r.o. *příručka obrábění*. Přel. Kudela, 1. vydání Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. ISBN 91-97-22 99-4
- [17] BARTOŠ, R.; GOROG, A.: *Determination of parameter Ra for the methods of finishing machining*. Faculty of Materials Science and Technology in Trnava, Trnava. 5 s.
- [18] HLUCHÝ, M.; KOLOUCH, J.: *Strojírenská technologie 1: Nauka o materiálu 1*. Vyd. 3. Praha: Scientia, spol. s. r. o., pedagogické nakladatelství, 2002. 266 s. ISBN 80-7183-262-6.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

mm	Milimetr	[-]
MPa	Megapascal	[-]
$\gamma_n$	Normální úhel čela	[rad]
$r_n$	Poloměr zaoblení ostří	[mm]
$a_e$	Pracovní (radiální) záběr	[mm]
$h_p$	Vrstva ovlivněná plastickou deformací	[mm]
$h_e$	Vrstva ovlivněná pružnou deformací	[mm]
$v_c$	Řezná rychlost	[m.min <sup>-1</sup> ]
$v_f$	Rychlost posuvu	[mm.min <sup>-1</sup> ]
Tab	Tabulka	[-]
$P_p$	Nástrojová rovina zadní	[-]
$P_r$	Nástrojová rovina základní	[-]
$P_f$	Nástrojová rovina boční	[-]
CNC	Číslicové řízení pomocí počítače	[-]
$N_s$	Frekvence otáčení brousícího kotouče	[ot.s <sup>-1</sup> ]
$N_w$	Frekvence otáček obrobku	[ot.s <sup>-1</sup> ]
$f_a$	Šířka broušené plochy	[mm]
$v_c$	Řezná rychlost	[m.min <sup>-1</sup> ]
$v_w$	Obvodová rychlost otáčení obrobku	[ot.s <sup>-1</sup> ]
$f_r$	Radiální posuv stolu na jednu otáčku obrobku	[ot.s <sup>-1</sup> ]
l	Délka obráběné plochy	[mm]
$n_{pk}$	Obvodová rychlost podávacího kotouče	[ot.s <sup>-1</sup> ]
$V_{fa}$	Obvodová rychlost obrobku	[ot.s <sup>-1</sup> ]
$V_{fa}$	Axiální rychlost posuvu obrobku	[mm.min <sup>-1</sup> ]

$v_{fr}$	Radiální rychlost posuvu stolu	$[m.min^{-1}]$
$b_s$	Šířka brousícího kotouče	$[mm]$
$v_{vř}$	Rychlost otáčení osy kotouče kolem osy díry	$[ot.s^{-1}]$
$v_{ft}$	Radiální rychlost příčného posuvu stolu	$[m.min^{-1}]$
$l_k$	Délka honovacích kamenů	$[mm]$
$v_e$	Rychlost řezného pohybu	$[m.min^{-1}]$
$l_z$	Zdvih honovací hlavy	$[mm]$
Např	Například	$[-]$
IT	Přesnosti	$[-]$
$\mu m$	Mikrony	$[-]$
$m.s^{-1}$	Metry za sekundu	$[-]$
kHz	Kilohertz	$[-]$
ČSN	Česká technická norma	$[-]$
Ra	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	$[\mu m]$
Pp, Rp, Wp	Největší výška výstupku profilu	$[\mu m]$
Pv, Rv, Wv	Největší hloubka prohlubně profilu	$[\mu m]$
Pz, Rz, Wz	Největší výška profilu	$[\mu m]$
Rsm	Průměrná šířka prvků profilu	$[mm]$
$D_w$	Průměr obrobku	$[\mu m]$
$n_w$	Frekvence otáčení obrobku	$[ot.s^{-1}]$
a	Amplituda základního kmitavého pohybu	$[-]$
v	Frekvence základního kmitavého pohybu	$[ot.s^{-1}]$
A	Dvojnásobná amplituda kmitavého pohybu	$[-]$
N	Newton	$[-]$
°	Stupně	$[-]$



viz	Odkaz na jinou stránku	[-]
obr.	Obrázek	[-]
č	Číslo	[-]
a	Konstanta úměrnosti	[-]
C	Integrační konstanta	[-]
$b_0, b_1, b_2, b_3$	Regresní koeficienty	[-]
$x_1, x_2, x_3$	Faktory etalonu	[-]
t	Čas	[-]
s	Sekunda	[-]
Ø	Průměr	[mm]
$s^2$	Rozptyl	[-]
s	Směrodatná odchylka	[-]
P	Pravděpodobnost	[-]
$\bar{x}$	Vážený průměr	[-]
atd	A tak dále	[-]
popř	Popřípadě	[-]
%	Procento	[-]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Popis úběru brousícího elementu: [1].....</i>	14
<i>Obr. 2. Kinematické charakteristiky broušení [5] .....</i>	15
<i>Obr. 3. Popis základních způsobů čelního broušení [1].....</i>	16
<i>Obr. 4. Princip obvodového broušení s podélným (axiálním) posuvem. [1] .....</i>	17
<i>Obr. 5. Vybrané způsoby obvodového broušení [1] .....</i>	17
<i>Obr. 6. Princip hloubkového broušení [1] .....</i>	18
<i>Obr. 7. Princip zapichovacího broušení [1].....</i>	19
<i>Obr. 8. Princip bezhrotého průběžného broušení[1] .....</i>	20
<i>Obr. 9. Princip bezhrotého zápichového broušení[1] .....</i>	21
<i>Obr. 10. Princip broušení vnitřního s posuvem podélným a přísuvem radiálním [1].....</i>	22
<i>Obr. 11. Schéma vnitřního broušení .....</i>	23
<i>Obr. 12. Schéma vnitřního bezhrotého broušení [6] .....</i>	24
<i>Obr. 13. Schéma bezhrotého broušení v tuhých opěrkách [1] .....</i>	25
<i>Obr. 14. Vnitřní planetové broušení [1] .....</i>	26
<i>Obr. 15. Rovinné broušení obvodové – přímočarý pohyb stolu [2] .....</i>	27
<i>Obr. 16. Rovinné broušení čelní [2] .....</i>	28
<i>Obr. 17. Schéma přípravku pro tvarování brousícího kotouče pomocí šablony [1] .....</i>	29
<i>Obr. 18. Kinematika honovacího procesu [1] .....</i>	30
<i>Obr. 19. Kinematické schéma superfinišování [1] .....</i>	32
<i>Obr. 20. Válečková hlava pro statické válečkování vnějších válcových ploch [1].....</i>	33
<i>Obr. 21. Kuličková hlava pro statické kuličkování děr [1] .....</i>	34
<i>Obr. 22. Obecné zobrazování struktury povrchu [1].....</i>	36
<i>Obr. 23. Příklad označování struktury povrchu v technické dokumentaci [1].....</i>	37
<i>Obr. 24. Příklad označení drsnosti povrchu [1].....</i>	38
<i>Obr. 25. Abrasivní metody broušení [1] .....</i>	39
<i>Obr. 26. Normy týkající se struktury povrchu [7,8] .....</i>	41
<i>Obr. 27. Skutečný profil povrchu [8] .....</i>	41
<i>Obr. 28. Jemná nerovnost (drsnost povrchu) [8] .....</i>	41
<i>Obr. 29. Vlnitost povrchu [8] .....</i>	42
<i>Obr. 30. Obecný tvar povrchu [8] .....</i>	42
<i>Obr. 31. Vlnitost povrchu [8] .....</i>	42
<i>Obr. 32. Drsnost povrchu [8] .....</i>	43

<i>Obr. 33. Posuzování drsnosti profilu Ra .....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 34. Největší výška výstupků profilu (příklad profilu drsnosti) [7] .....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 35. Největší hloubka prohlubně profilu (příklad profilu drsnosti) [7] .....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 36. Největší výška profilu (příklad profilu drsnosti) [7] .....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 37. Průměrná výška prvku profilu (příklad drsnosti povrchu) [7] .....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 38. Šířka prvku profilu [8] .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 39. Princip superfinišování [10] .....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 40. Dotykový profilometr [11] .....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 41. Metoda světelného řezu – princip a obraz v okuláru [11] .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 42. Interferenční mikroskop [11] .....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 43. Obraz v okuláru přístroje [11] .....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 44. Naměřené hodnoty Ra na čase .....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 45. Grafické znázornění normálního rozdělení .....</i>	<i>71</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1. Dosahované parametry: broušení [4] .....</i>	14
<i>Tab. 2. Volba řezných podmínek při bezhrotém broušení-průběžný způsob [1] .....</i>	21
<i>Tab. 3. Volba řezných podmínek při bezhrotém broušení-zapichovací způsob [1].....</i>	21
<i>Tab. 4. Volba řezných poměrů při vnitřním broušení [1].....</i>	23
<i>Tab. 5. Základní délky pro měření drsnosti <math>R_a</math>, <math>R_q</math>, <math>R_{sk}</math>, <math>R_{ku}</math>, <math>R_{\Delta q}</math> a také křivek odpovídající parametry pro neperiodické profily [12, 14] .....</i>	56
<i>Tab. 6. Délka základní drsnosti pro měření <math>R_z</math>, <math>R_v</math>, <math>R_p</math>, <math>R_c</math> a <math>R_t</math> neperiodických profilů [12, 14] .....</i>	56
<i>Tab. 7. Délky základní drsnosti pro měření R-parametrů periodických profilů s <math>R_{Sm}</math> periodických a neperiodických profilů [12, 14] .....</i>	56
<i>Tab. 8. Trojfaktorový experiment – první část [17] .....</i>	65
<i>Tab. 9. Trojfaktorový experiment – druhá část [17] .....</i>	65
<i>Tab. 10. Trojfaktorový experiment – třetí část [17] .....</i>	65
<i>Tab. 11. hodnoty závislosti <math>R_a</math> na čase .....</i>	69
<i>Tab. 12. Naměřené hodnoty <math>R_a</math> v čase 5 s. ....</i>	70
<i>Tab. 13. Naměřené hodnoty <math>R_a</math> v čase 10 s. ....</i>	72
<i>Tab. 14. Naměřené hodnoty <math>R_a</math> v čase 20 s. ....</i>	74
<i>Tab. 15. Naměřené hodnoty <math>R_a</math> v čase 30 s. ....</i>	75
<i>Tab. 16. Naměřené hodnoty <math>R_a</math> v čase 40 s. ....</i>	77
<i>Tab. 17. Naměřené hodnoty <math>R_a</math> v čase 50 s. ....</i>	78
<i>Tab. 18. Naměřené hodnoty <math>R_a</math> v čase 60 s. ....</i>	80
<i>Tab. 19. Vypočtené hodnoty v časech 5, 10, 20 sekund .....</i>	82
<i>Tab. 20. Vypočtené hodnoty v časech 30, 40, 50, 60 sekund .....</i>	82

**SEZNAM PŘÍLOH**

## **PŘÍLOHA P I: NÁZEV PŘÍLOHY**